

ARTÍCULO

Parámetros meteorológicos, represamiento fluvial y huracanes. Variaciones en la hidrología del golfo de Batabanó, Cuba

Meteorological parameters, fluvial damming and hurricanes. Variations in the hydrology in the Batabanó Gulf, Cuba

Abel Betanzos-Vega¹, Norberto Capetillo-Piñar², Alexander Lopeztegui-Castillo³, Yuliesky Garcés-Rodríguez³ y Arturo Tripp-Quezada^{3*}

¹Centro de Investigaciones Pesqueras, calle 246 # 503 e/ 5ta y Mar, Santa Fé, Playa, La Habana, Cuba

²Federación de Cooperativas Pesqueras Zona Centro, FEDECOOP Zona Centro, La Paz, Baja California Sur, México

³Instituto Politécnico Nacional, Unidad Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas, Col. Playa Palo Santa Rita, Ap. 592, La Paz, México

*Autor corresponsal: atripp@ipn.mx

Abstract.- The Gulf of Batabanó (GB), is the region of the Cuban marine platform of greater extension and fishing importance. Habitat effects of marine species have been reported as a consequence of natural and anthropic factors. The objective was to determine significant spatio-temporal variations in the hydrology of GB in different periods and environmental situations. For this, the variability of rainfall and air temperature was analyzed in 1975-1995 and 1996-2015 periods of low and high cyclonic activity, the thermohaline characteristics of the GB before (1959-1970) and after (2006-2016) the river damming, and the effect of two hurricanes almost simultaneous in 2008 ("Gustav" and "Ike"). Significant differences in the interannual variability of meteorological parameters between the north and south of the GB corresponded to local characteristics, and changes occurred in the distribution of the months of maximum rainfall. The perennial impact of the damming, coupled with temporary precipitation deficits in spring, summer and winter, caused thermohaline increases in 2006-2016, with an increase of 0.7 °C in water temperature and 2.3 in average salinity of the GB, with respect to 1959-1970. Salinity showed an increase in the distribution of hypersaline values, and an average > 36 in months of high rainfall, with a general average of 35.4 in 1959 -1970 and 37.7 in 2006-2016, this suggests that damming has been a major factor in the increase in salinity. The thermohaline impact in the GB of two hurricanes in 2008 was restored in the short term, with greater inertia in turbidity.

Key words: Southwestern platform, space-time variation, hydrometeorology

Resumen.- El golfo de Batabanó (GB), es la región de la plataforma marina cubana de mayor extensión e importancia pesquera. Afectaciones al hábitat de especies marinas han sido señaladas como consecuencia de factores naturales y antrópicos. El objetivo fue determinar variaciones espacio-temporales significativas en la hidrología del GB en diferentes periodos y situaciones ambientales. Para ello se analizó la variabilidad de la lluvia y la temperatura del aire en 1975-1995 y 1996-2015 periodos de baja y alta actividad ciclónica, las características termohalinas del GB anterior (1959-1970) y posterior (2006-2016) al represamiento fluvial, y el efecto de dos huracanes casi simultáneos en 2008 ("Gustav" e "Ike"). Diferencias significativas en la variabilidad interanual de parámetros meteorológicos entre el norte y el sur del GB respondieron a características locales, y ocurrieron cambios en la distribución de los meses de máximas precipitaciones. El represamiento fluvial, sumado a déficits de precipitación en primavera, verano e invierno, provocaron aumentos termohalinos en 2006-2016, con incremento de 0,7 °C en la temperatura del agua y de 2,3 en la salinidad promedio del GB, respecto a 1959-1970. La salinidad mostró una ampliación en la distribución de valores hipersalinos, y media > 36 en meses de altas precipitaciones, con promedio general de 35,4 en 1959-1970 y 37,7 en 2006-2016, esto sugiere que el represamiento ha sido un factor principal en las variaciones de salinidad. El impacto termohalino en el GB de dos huracanes en 2008, se restableció en corto plazo, con mayor inercia en la turbidez.

Palabras clave: Plataforma suroccidental, variación espacio-temporal, hidrometeorología

INTRODUCCIÓN

Según datos históricos (1970-2008) de temperatura media anual del aire, para Cuba se indica un incremento de 0,6 °C, debido al aumento de la temperatura mínima (Centella *et al.* 1997, Hernández-Zanuy *et al.* 2009). Este resultado no difiere del criterio del Panel Internacional de expertos sobre Cambio Climático (IPCC 2007) que plantea que la temperatura de la superficie terrestre aumentó aproximadamente 0,6 ± 0,2 °C desde 1850.

Se menciona, para las aguas oceánicas al sur del golfo de Batabanó (GB), una tendencia creciente de la temperatura superficial del mar (TSM) a partir de 1994 (Fernández-Vila *et al.* 2010), lo que también pudiera incidir en la hidrología del GB. Los incrementos en la TSM coadyuvan al desarrollo de las tormentas tropicales y huracanes, que alcanzan categorías 4 y 5, incrementándose desde 1970 en la región del Atlántico, con mayor frecuencia e intensidad posterior al 2004 (Trenberth *et al.* 2007). Para

Cuba se señala un incremento de huracanes en el periodo 1996-2005, superior en 8 veces a los registrados en el periodo 1970-1995, siendo más frecuentes para la región suroccidental (golfo de Batabanó), generando un impacto de origen natural en las pesquerías y en la calidad de los hábitats (Puga *et al.* 2013).

Un impacto adicional de origen antrópico es el represamiento de los ríos (Santos *et al.* 2017), con consecuencias en la hidrología y la biota de la plataforma cubana (Baisre & Arboleya 2006, Piñeiro *et al.* 2006). En la zona costera suroccidental de Cuba y específicamente al sur de la provincia de Pinar del Río, ocurría el mayor escurrimiento al golfo de Batabanó (Suárez *et al.* 1976), el cual se reduce en un 80% al incrementarse la capacidad de embalse de aguas fluviales, de 17,35 Hm³ antes de 1970 hasta 797,46 Hm³ posterior a 1990 (Piñeiro *et al.* 2006). En consecuencia, se señala una disminución en el aporte de nutrientes y un aumento de salinidad en las aguas litorales al oeste del GB (Piñeiro, 2006).

Los efectos de las perturbaciones naturales vinculadas al cambio climático (principalmente la ocurrencia de huracanes de alta intensidad) combinados con diversas acciones antropogénicas (represamiento de los ríos, deforestación del manglar, construcción de diques y actividad agrícola-industrial) han sido señalados como factores de impacto para el GB, en su medio físico (Acker *et al.* 2004, Guerra *et al.* 2005) y biológico (Arias-Schreiber *et al.* 2008, Cerdeira *et al.* 2008, Martínez-Daranas 2009, Puga *et al.*

2013, Capetillo-Piñar *et al.* 2016). Sin embargo, se carece de estudios en los cuales se analicen las variaciones espacio-temporales de parámetros meteorológicos e hidrológicos *in situ* en la plataforma suroccidental de Cuba, en función del efecto generado por eventos antrópicos y naturales. Por tales razones, determinar las variaciones de la temperatura del aire y la lluvia, según periodos de baja y alta actividad ciclónica y la respuesta hidrológica del GB ante situaciones ambientales, derivadas del impacto del represamiento de aguas fluviales posterior a 1970 y el paso de dos huracanes de alta intensidad en 2008, fue el objetivo de este trabajo.

MATERIALES Y MÉTODOS

El área de estudio comprende la plataforma suroccidental de Cuba (Fig. 1) o golfo de Batabanó (GB), con área total de 21,305 km², anchura máxima de 140 km (norte-sur), longitud máxima > 300 km (este-oeste). En su interior presenta 672 zonas emergidas (bajos, islas, cayos y cayuelos), y su profundidad media es de 6 m (Emilsson & Tápanes 1971, Alcolado 1990, González-Ferrer *et al.* 2004). El GB limita al norte y oeste con la zona litoral de la región suroccidental de Cuba, y por el sur y este con un cordón de cayos, bajos y restingas que lo bordean, incluyendo la Isla de la Juventud, que protegen el golfo del impacto del oleaje proveniente de las aguas oceánicas adyacentes, lo que ha motivado que en ocasiones se considere este cuerpo de agua como una macrolaguna (Lluis-Riera 1972, Alcolado 1990, Cerdeira *et al.* 2008).

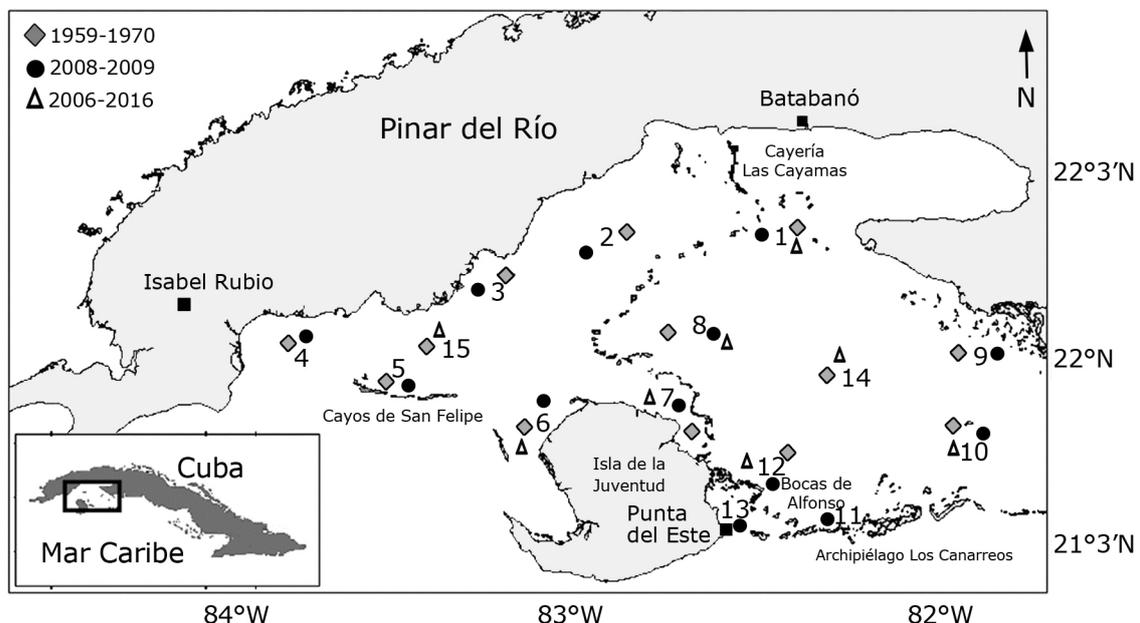


Figura 1. Plataforma suroccidental (Golfo de Batabanó), red de 15 sitios de muestreo hidrológico *in situ*, diferenciadas las estaciones por periodos de estudio, y estaciones meteorológicas (Isabel Rubio, Batabanó, Punta del Este) / Southwestern platform (Gulf of Batabanó), network of 15 hydrological sampling sites, differentiated stations by study periods, and weather stations (Isabel Rubio, Batabanó, Punta del Este)

Al centro del golfo, un cordón de cayos y bajos se extiende de sur a norte, desde los cayos de Bocas de Alonso, este de la Isla de la Juventud, hasta la cayería de Las Cayamas al norte (Fig. 1), constituyendo una barrera natural que según Emilsson & Tápanes (1971), restringe el paso del agua entre las zonas este (ZE) y oeste (ZW), y marca diferencias entre ambas zonas en cuanto a tipología de los sedimentos y biotopos (Armenteros *et al.* 2008, Cerdeira *et al.* 2008, Martínez-Canals *et al.* 2008, Capetillo *et al.* 2011).

METODOLOGÍA PARA DETERMINAR VARIACIONES ESPACIO - TEMPORALES DE PARÁMETROS METEOROLÓGICOS

Debido a la poca profundidad del GB, las variaciones de parámetros meteorológicos ejercen un efecto significativo y a corto plazo en su hidrología (Emilsson & Tápanes 1971, García *et al.* 1989, 1995; Fernández-Vila *et al.* 2010). En consecuencia, se utilizaron datos anuales y mensuales de temperatura del aire (°C) y lluvia (mm), de los años 1975-2015 registrados por las estaciones meteorológicas (EM) de monitoreo continuo (Fig. 1) localizadas en Isabel Rubio (EMIR) al noroeste, Batabanó (EMB), al norte, y Punta del Este (EMPE) en la Isla de la Juventud al sur de la región suroccidental de Cuba, a una distancia entre ellas de entre 100 y 180 km lineales, para determinar su variabilidad interanual y mensual, y conocer su influencia en el GB. Demostrada la similitud estadísticamente significativa entre las estaciones meteorológicas EMIR y EMB, y de acuerdo a criterios de influencia terrestre de la EMIR por mayor distancia de la costa (García *et al.* 1989), se descartó de la comparación entre el norte y el sur del GB. En analogía al incremento en la frecuencia e intensidad de huracanes en la región suroccidental de Cuba a partir de 1996 (Puga *et al.* 2013), se analizaron la temperatura del aire y la lluvia según periodos 1975-1995 (21 años) y 1996-2015 (20 años).

VARIACIONES TERMOHALINAS ANTES Y DESPUÉS AL REPRESENTAMIENTO DE AGUAS FLUVIALES EN EL GB

Las variables hidrológicas utilizadas fueron la temperatura del agua y la salinidad, debido a su influencia en la densidad de las aguas y su efecto en la hidrodinámica (Egorov 1974). Los datos *in situ* del periodo 1959-1970 (n= 117), corresponden a datos de 15 estaciones de muestreo hidrológico seleccionadas de 9 cruceros oceanográficos (Suárez-Caabro & Duarte-Bello 1962, Emilsson & Tápanes 1971, Lluís-Riera *et al.* 1972, 1987). Los datos *in situ* del periodo 2006-2016 (n= 210) corresponden a 21 estaciones seleccionadas de 10 cruceros, 4 de ellos ejecutados entre 2008 y 2009 por el Centro de Investigaciones Pesqueras de Cuba, y 6 cruceros entre 2006 y 2016 de la Agencia de Investigaciones Marinas de GEOCUBA Estudios Marinos, Cuba. Ambos periodos (1959-1970 y 2006-2016) fueron escogidos debido a mayor frecuencia y similitud en los meses de muestreo, y en la distribución y posición geográfica de las estaciones hidrológicas, y como referencia

de un periodo anterior al inicio (1971) del represamiento de aguas fluviales en la región, y de un periodo reciente y posterior al máximo represamiento fluvial alcanzado en Cuba (1999).

La red de estaciones se homogeneizó numéricamente resultando en 15 sitios del GB (Fig. 1), de los cuales siete correspondieron a estaciones en la zona oeste (ZW) (est. 2, 3, 4, 5, 6, 7 y 15), y 8 a estaciones de la zona este (ZE) (est. 1, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14). Para el análisis comparativo entre ambos periodos se trabajó con promedios de cada sitio, según ZE y ZW, por épocas climáticas: primavera, verano, otoño e invierno.

Las variables temperatura del agua y salinidad del periodo 1959-1970, se obtuvieron respectivamente con termómetros reversibles o de inversión (precisión de 0,01 °C) y por el método de Knudsen y salinómetro inductivo Tsurimi-Seiki (precisión de $\pm 0.003\%$), y en el periodo 2006-2016 se registraron con una sonda multiparamétrica HANNA® HI 9828 (precisión de $\pm 0,01$ °C, ‰), y la turbidez con un turbidímetro HANNA® HI 93703-11 con precisión de $\pm 0,01$ FTU (Unidad de Turbidez de la Formazina).

EFFECTO DE DOS HURACANES EN LA HIDROLOGÍA DEL GB

La variación espacio-temporal en la hidrología del GB originada por los huracanes, fue analizada según variables que permiten definir cambios en la hidrodinámica y calidad de las aguas (Egorov 1974, Betanzos *et al.* 2013). Para el caso que ocupa fueron analizadas: la temperatura del agua (°C), salinidad y turbidez (FTU), según estaciones del periodo 2008-2009 (Fig. 1), en el cual se realizaron cruceros en agosto, octubre y diciembre 2008, y en abril y agosto 2009. El crucero de agosto 2008 se realizó antes del paso por la región (30 de agosto 2008) del Huracán “Gustav” (categoría SS4 según la escala de Saffir-Simpson), y 10 días después (9 de septiembre 2008) impactó la región el Huracán “Ike” (categoría SS2). Ambos eventos mostraron trayectorias con rumbos SE-NW, afectando prácticamente todo el GB (Capetillo-Piñar *et al.* 2016); un escenario poco común que permitió estimar el alcance de su impacto en la hidrología de la región al realizar cuatro muestreos posteriores: a 36 días (octubre 2008), 3 meses (diciembre 2008), 7 meses (abril 2009), y un año (agosto 2009) después del paso casi simultáneo de estos eventos.

Para una mejor visualización de la distribución espacial de las variables hidrológicas evaluadas se construyeron mapas de distribución horizontal con el programa de análisis y mapeo MATLAB versión 7 (Matrix Laboratory, por sus siglas en inglés). Se muestran los que fueron construidos para la salinidad y turbidez según situación anterior e inmediato posterior al paso de los huracanes. No se construyó el de temperatura por la diferencia en la distribución espacial que se introduce por el horario de muestreo, debido al ciclo diurno de esta variable.

ANÁLISIS ESTADÍSTICOS

Los análisis estadísticos se realizaron con el programa STATGRAPHICS® Centurion XV (Statgraphics.Net, Madrid), y las pruebas para determinar la normalidad de los datos [Prueba-F y verificación de la Varianza para comparar las desviaciones estándar (DE)] se obtuvieron siguiendo las recomendaciones de Zar (1984). Para comparaciones, entre periodos y zonas, de las variables meteorológicas evaluadas, se utilizó un ANOVA de una vía, seguido de la prueba de comparaciones múltiples LSD (Less Significant Difference) de Fisher; y se muestran en valores sub-índices en la razón F (ANOVA) los grados de libertad (gl) entre e intra grupos respectivamente. Para determinar las diferencias o similitudes en la temperatura y salinidad entre periodos (1959-1970 y 2006-2016), y entre zonas (norte y sur; este y oeste) del GB, corroborada una distribución normal, se utilizó la prueba paramétrica de comparación de medias de *t*-Student. Para determinar las diferencias o similitudes de las variables hidrológicas (temperatura, salinidad, turbidez), entre los meses de muestreo anterior y posterior al paso de los huracanes y debido a que los datos de las tres variables mostraron atipicidad (diferencia significativa entre las DE), se utilizó la prueba no paramétrica (Kruskal-Wallis), con salida gráfica de caja y bigotes. En todos los análisis se estableció como valor de significación $P=0,05$. Los valores promedios se expresan con la desviación estándar (media \pm DE).

RESULTADOS

ANÁLISIS ESPACIO-TEMPORAL DE LAS VARIABLES METEOROLÓGICAS TEMPERATURA DEL AIRE Y LLUVIA

Al comparar los datos anuales (1975-2015) de la temperatura media del aire (ANOVA; $F_{(2, 111)} = 174,88$, $P = 0,001$) y del acumulado de lluvia (ANOVA; $F_{(2, 120)} = 3,87$, $P = 0,02$), ambas variables mostraron diferencias estadísticas significativas entre las 3 estaciones meteorológicas evaluadas (Fig. 2). Isabel Rubio (EMIR) y Batabanó (EMB), al noroeste y norte del GB respectivamente, no mostraron diferencias significativas en la temperatura del aire (Fig. 2a) y lluvia (Fig. 2b), esto evidenció una mayor diferencia entre el norte y sur. La temperatura media del aire de todo el periodo evaluado (1975-2015) fue más baja ($24,34 \pm 0,46$ °C) al norte (EMB) que la registrada al sur (EMPE), de $25,80 \pm 0,26$ °C.

Tanto al norte como al sur del golfo de Batabanó, la temperatura media anual del aire mostró propensión a la disminución desde 1975 hasta 2010 con predominio de valores inferiores a la media histórica en los periodos 1983-1990 y 2005-2010 (Fig. 3a), e incremento posterior. Sin embargo, según medias móviles de 5 años la tendencia general ha sido al incremento. Al analizar entre los periodos 1975-1995 y 1996-2015, de menor y mayor actividad ciclónica respectivamente, no se halló diferencia estadística

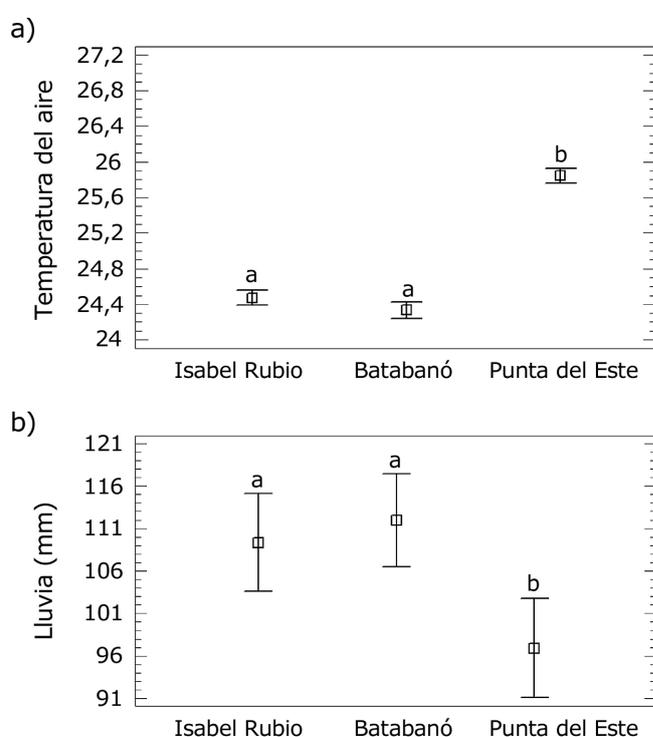


Figura 2. Comparación de la temperatura del aire (a) y la lluvia (b), promedio anual (1975-2015), entre las estaciones meteorológicas costeras. Medias e intervalos LSD de Fisher ($P < 0,05$) / Comparison of air temperature (a) and rain (b), annual average (1975-2015), between coastal weather stations. Mean and Fisher LSD intervals ($P < 0.05$)

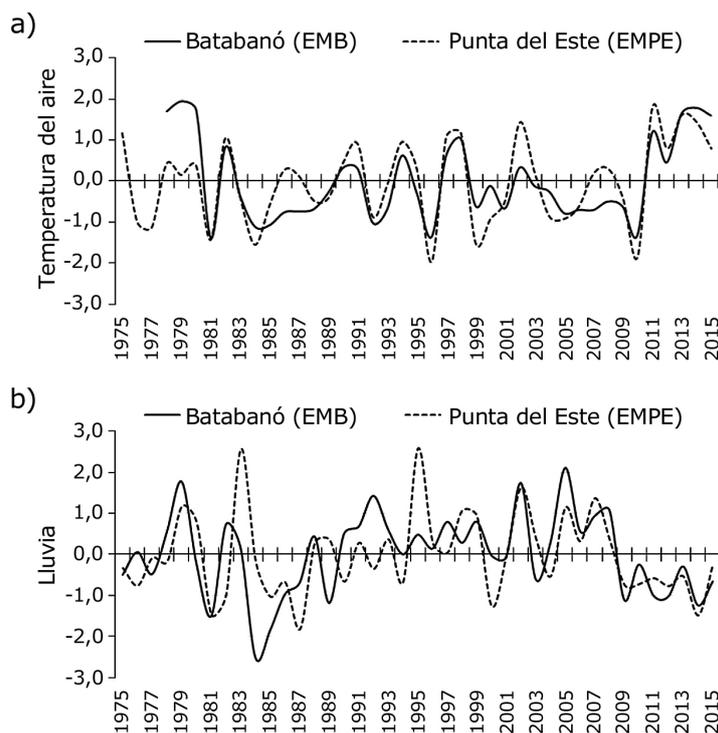


Figura 3. Variación interanual (en anomalías estandarizadas) de la temperatura del aire (a) y de la lluvia (b), según estaciones meteorológicas de Batabanó (norte del GB) y Punta del Este (sur del GB) / Interannual variation (in standardized anomalies) of the temperature of the air (a) and of the rain (b), according to meteorological stations of Batabanó (north of the GB) and Punta del Este (south of the GB)

significativa en la variabilidad interanual de la temperatura del aire al norte del GB (ANOVA; $F_{(1,38)} = 1,14, P = 0,29$), ni al sur (ANOVA; $F_{(1,38)} = 0,91, P = 0,35$); ni en la variabilidad promedio mensual (ANOVA; $F_{(1,22)} = 0,04, P = 0,84$) al norte y al sur (ANOVA; $F_{(1,22)} = 0,01, P = 0,94$).

Respecto a la variabilidad interanual de la lluvia de 1975 a 2015, tanto al norte como al sur del golfo, se presentaron periodos alternos de máximas y mínimas precipitaciones, con déficit en el periodo 1983-1990 (Fig. 3b) coincidente con bajas temperaturas (Fig. 3a), y predominio de acumulados de lluvia anual superiores a la media histórica desde 1991 hasta el 2008, excepto en 2000, 2003-2004, y acumulados inferiores a la media histórica de 2009 a 2015. Sin embargo, las precipitaciones en ambas regiones, mostraron diferencias estadísticamente significativa (ANOVA; $F_{(1,80)} = 5,16, P = 0,03$), la zona norte (EMB) con un mayor acumulado de lluvia promedio anual ($1320,64 \pm 291$ mm) que el registrado ($1168,94 \pm 313$ mm) al sur (EMPE).

Al analizar el patrón estacional de lluvia, según promedios mensuales de los periodos 1975-1995 y 1996-2015, no se encontraron diferencias estadísticas significativas (ANOVA; $F_{(1,24)} = 0,07, P = 0,81$) entre ambos periodos ni entre las regiones norte y sur; sin embargo,

se evidenció un cambio en la ubicación de los meses con valores medios máximos de precipitaciones (Fig. 4). Durante 1975-1995, junio y julio mostraron los máximos promedios mensuales de lluvia (≈ 150 mm) en ambas regiones, mientras que en el periodo 1996-2015 se compartió (> 200 mm) entre agosto y septiembre en Batabanó (norte) y entre septiembre y octubre en Punta del Este al sur (Fig. 4).

VARIACIONES TERMOHALINAS ANTES (1959-1970) Y DESPUÉS (2006-2016) AL REPRESAMIENTO

La temperatura media del agua para todo el GB, fue inferior en 1959-1970 ($27,5 \pm 2,1$ °C) que en 2006-2016 ($28,2 \pm 2,6$ °C), con mínima promedio de $22,7 \pm 1,7$ °C en 1959-1970 y de $24,5 \pm 2,2$ °C en 2006-2016, y máxima promedio de $30,4 \pm 1,9$ °C y $31,9 \pm 2,3$ °C respectivamente; y aunque fue evidente el incremento en la temperatura media del agua ($0,7$ °C), no se encontraron diferencias estadísticas significativas entre ambos periodos ($t = 0,31; P = 0,76$). Entre el norte y el sur del GB hubo diferencias significativas durante 1959-1970 ($t = 0,19; P = 0,04$), a diferencia del periodo 2006-2016 ($t = 0,21; P = 0,41$). Entre las zonas este y oeste, no se encontró diferencias estadísticas en 1959-1970 ($t = 0,07; P = 0,94$), ni en el periodo 2006-2016 ($t = 0,18; P = 0,86$).

Los máximos (verano) y mínimos (invierno) de temperatura del agua ocurrieron en concordancia con su ciclo estacional, pero en el periodo 1959-1970 la primavera mostró una temperatura media inferior a la del otoño (Fig. 5), ocurriendo de forma contraria en el periodo 2006-2016, lo que denotó una redistribución en las tendencias de la primavera y el otoño. Por estaciones climáticas (Fig. 5), la diferencia en grados Celsius (ΔT) entre promedios de la temperatura del agua en 2006-2016 respecto a 1959-1970, fue más alta en primavera ($\Delta T = 1,37\text{ }^{\circ}\text{C}$), verano ($\Delta T = 0,77\text{ }^{\circ}\text{C}$) e invierno ($\Delta T = 0,95\text{ }^{\circ}\text{C}$), e inferior en el otoño ($\Delta T = -0,66$), pero sólo en la primavera mostró diferencia estadística significativa ($t = 2,49$; $P = 0,01$).

Contrario a la temperatura del agua, la salinidad general del golfo mostró diferencias estadísticas ($t = 2,71$; $P = 0,03$) entre ambos periodos, siendo más significativo su

incremento en la primavera y verano de 2006-2016 (Fig. 5). Los resultados demuestran una menor salinidad en el periodo anterior al inicio del represamiento de aguas fluviales, al registrarse un promedio general para todo el GB en 1959-1970 de $35,41 \pm 0,69$, y de $37,65 \pm 1,17$ en el periodo 2006-2016. Entre las zonas norte y sur del GB, no se encontraron diferencias significativas ($P \geq 0,05$) de la salinidad en ninguno de los dos periodos (1959-1970 y 2006-2016). En el periodo 1959-1970, entre las zonas este y oeste, aunque no se encontraron diferencias estadísticas ($t = 2,23$; $P = 0,06$) la salinidad media al oeste del GB fue inferior ($34,84 \pm 0,51$) a la del este ($35,89 \pm 0,78$). Para el periodo 2006-2016, ocurrió un cambio en la ubicación de los máximos y mínimos promedio, al oeste del GB la salinidad fue superior ($37,45 \pm 1,24$) a la de la zona este ($37,05 \pm 1,11$), pero sin diferencias estadísticas entre ambas zonas ($t = 0,48$; $P = 0,65$).

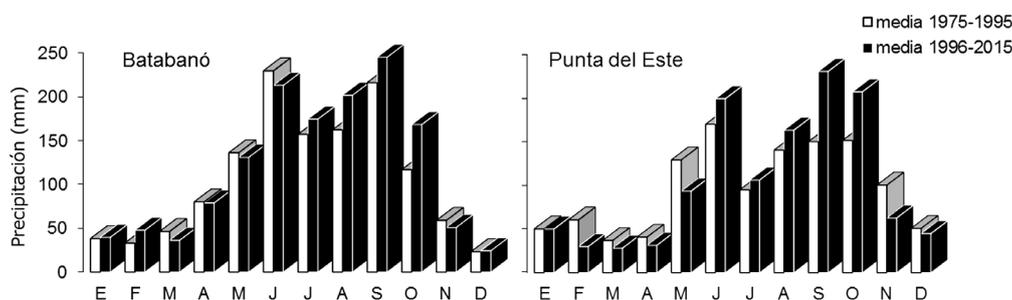


Figura 4. Variabilidad estacional del acumulado de lluvia promedio mensual por periodos, según regiones norte (Batabanó) y sur (Punta del Este) del golfo de Batabanó / Seasonal variability of cumulative monthly average rainfall for periods as northern regions (Batabanó) and south (Punta del Este) in the Batabanó Gulf

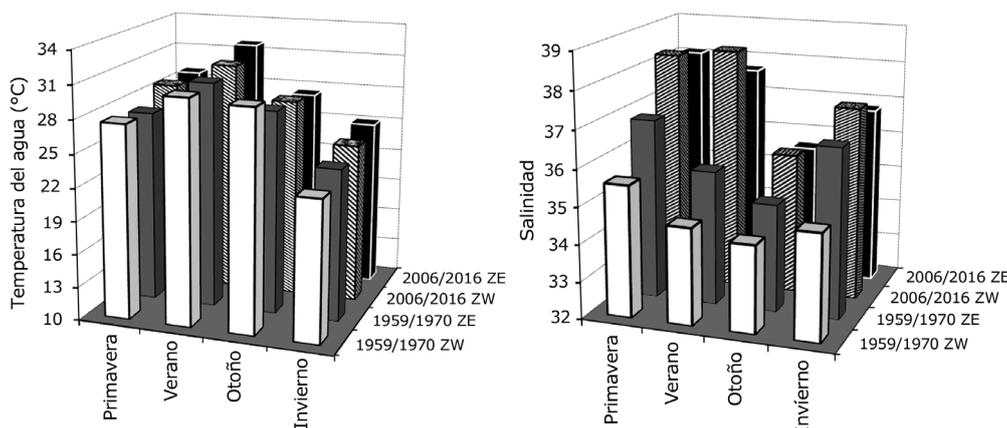


Figura 5. Promedios de temperatura del agua y salinidad por estaciones climáticas, según periodos 1959-1970 y 2006-2016, y zonas este (ZE) y oeste (ZW) del golfo de Batabanó/ Averages of water temperature and salinity by climatic seasons, according to periods 1959-1970 and 2006-2016, and east (ZE) and west (ZW) zones in the Batabanó Gulf

EFFECTO DE LOS HURACANES EN LAS VARIACIONES ESPACIO-TEMPORALES EN LA HIDROLOGÍA DEL GB

Durante el muestreo de agosto 2008, previo al huracán “Gustav”, la temperatura media del agua en el GB fue de $31,7 \pm 0,9$ °C, la salinidad de $38,7 \pm 1,6$ y se presentó una alta transparencia en las aguas que se reflejó en una turbidez de $1,23 \pm 0,58$ FTU. En octubre 2008, 36 días después del paso de los huracanes “Gustav” e “Ike”, la temperatura media del agua disminuyó $4,1$ °C (media de $27,6 \pm 0,8$ °C), la salinidad media del GB disminuyó, manteniendo sus características marinas ($36,1 \pm 1,2$), y la turbidez promedio para todo el GB fue de $6,87 \pm 4,46$ FTU, con máximo de $17,62$ FTU en la estación 3 cercana a la costa. Estas diferencias incidieron en la atipicidad de los datos, y al comparar (Kruskal-Wallis) entre muestreos, antes y después de los huracanes (Fig. 6), se encontraron diferencias estadísticas significativas ($P < 0,05$) en las variaciones termohalinas y en la turbidez según meses. La temperatura del agua fue máxima en agosto y mínima en abril, y no mostró diferencias significativas ($P < 0,05$) entre octubre, diciembre y abril (Fig. 6a); respecto a la salinidad (Fig. 6b) y la turbidez (Fig. 6c), octubre 2008 (muestreo inmediato posterior al paso de ambos eventos)

fue estadísticamente diferente ($P < 0,05$) al resto de los meses evaluados.

La distribución espacial (Fig. 7), antes del paso de los huracanes (agosto 2008), confirma la alta salinidad en el GB con valores máximos de 39 a 41 (Fig. 7a) al norte y oeste del GB, y mínimos al sur y este (< 37). En el muestreo inmediato posterior al paso de los huracanes (octubre 2008), aún con altas precipitaciones, se mantiene una salinidad de 37-38 al centro oeste y hacia el sur del GB, con mínimo de 34,5 cercano a la costa norte (Fig. 7b), lo que corrobora la reducción de escurrimientos fluviales. La turbidez, en sentido general mostró los mínimos en agosto 2008 antes del paso de los huracanes (Fig. 6c), con máximos puntuales en el extremo oeste (2,2 FTU) y al norte del GB (< 2 FTU), en zonas adyacentes a cuencas hidrográficas y lagunas costeras. El escenario posterior al paso de “Gustav” e “Ike” (octubre 2008), de mayor turbidez mensual, mostró los máximos (> 11 FTU) al oeste del GB (Fig. 7d). Si la zona de máxima turbidez (centro-oeste) en octubre 2008 (Fig. 7d) no es coincidente con la de menor salinidad (Fig. 7b), no debe ser causa de escurrimientos terrígenos, y sugiere que ocurre un desplazamiento o transporte de sedimentos hacia el oeste y suroeste del GB.

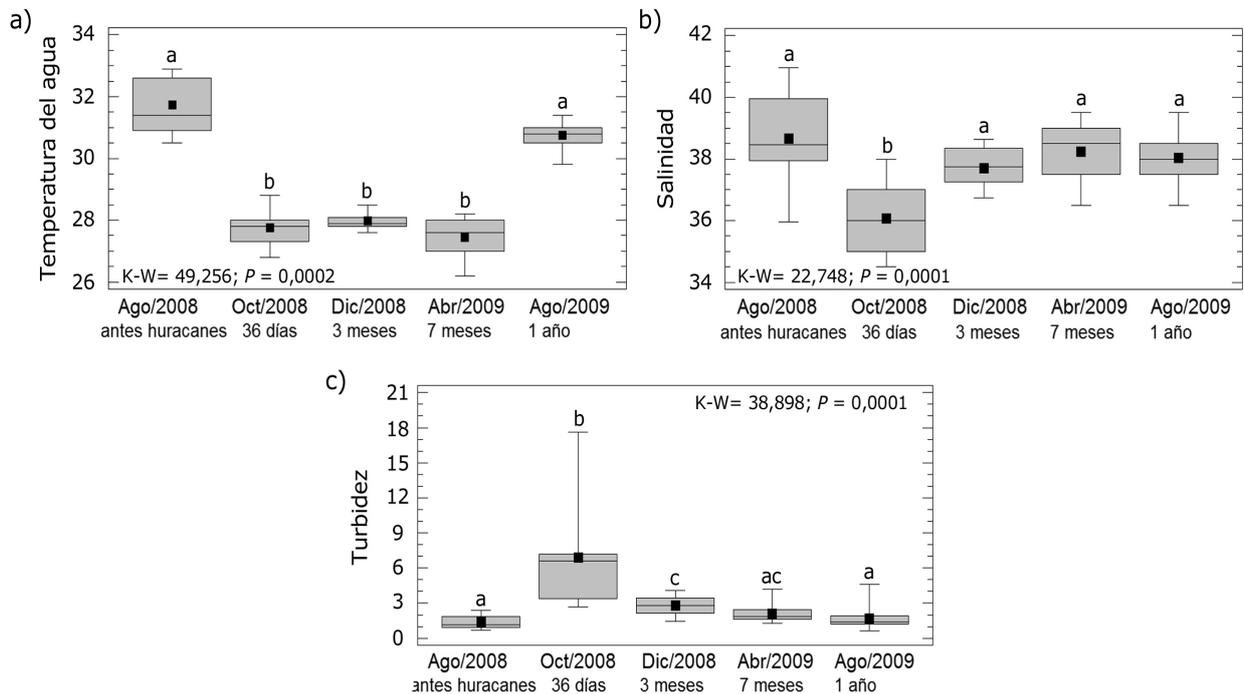


Figura 6. Comparación entre muestreos antes y después del paso de los huracanes “Gustav” e “Ike” de la temperatura (a), salinidad (b) y turbidez (c). Letras desiguales (a, b, c) en los análisis muestran resultados estadísticamente diferentes ($P < 0,05$) / Comparison between samples, before and after the passage of hurricanes “Gustav” and “Ike”, of temperature (a), salinity (b) and turbidity (c). Uneven letters (a, b, c) in the analyzes show statistically different results ($P < 0.05$)

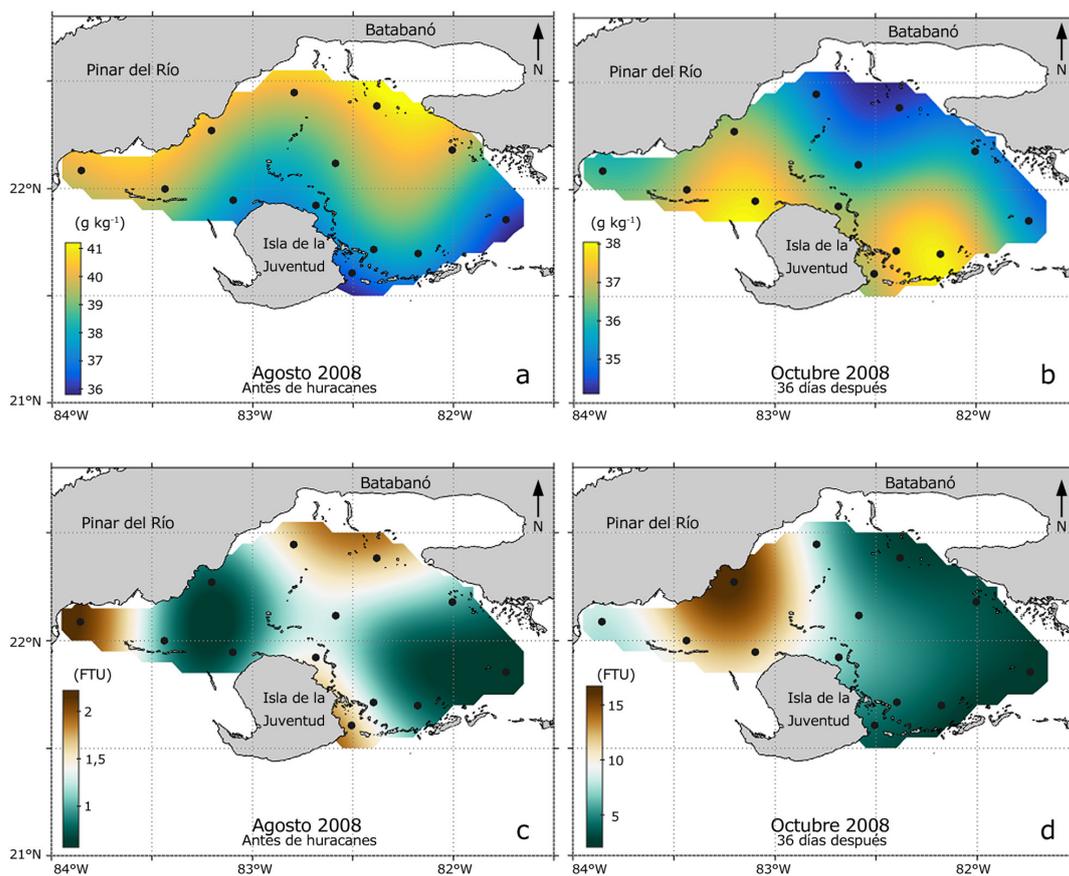


Figura 7. Distribución espacial de la salinidad (a, b) y la turbidez (c, d) en unidad de turbidez de la formacina (FTU), según muestreos antes y 36 días después de los huracanes "Gustav" e "Ike" / Spatial distribution of salinity (a, b) and turbidity (c, d) in formazine turbidity unit (FTU), according to samples before and 36 days after hurricanes "Gustav" and "Ike"

DISCUSIÓN

En Cuba, la temperatura (del aire y del mar) aumentan hacia el sur y el este (Fernández-Vila *et al.* 2010), y las precipitaciones disminuyen de oeste a este y de norte a sur (Aguirre 2004). La masa de agua (60-140 millas náuticas) que se extiende de norte a sur del GB propicia un incremento térmico y mayor estabilidad termohalina al sur, siendo un moderador de las condiciones térmicas (Gómez 1980), a lo que se suma la influencia de las aguas del mar Caribe al sur del GB, todo lo cual condiciona y determina las características meteorológicas al norte y sur del GB; las que influyen en la hidrología, tal y como se demuestra en la alta correlación ($r^2=0,89$; $\alpha < 0,05$) entre la temperatura del aire y del agua en la región (García *et al.* 1989 y 1995).

En meses de máxima evaporación en Cuba, de marzo a junio (Dietrich 1963, Garcés *et al.* 2012, Betanzos & Mazón-Suástegui 2014), fue evidente una reducción en los acumulados promedio de lluvia durante el periodo 1996-2015, e incrementos pluviales entre agosto y octubre, meses que han presentado una mayor inestabilidad atmosférica

y ocurrencia de perturbaciones ciclónicas posterior a 1996 (Hernández-Zanuy *et al.* 2009, Puga *et al.* 2013), esta situación confirma un cambio o redistribución de los máximos de precipitaciones respecto al periodo anterior (1975-1995). Un déficit de precipitaciones en meses de alta evaporación, tendría una respuesta en la salinidad del GB, ya que esta depende de la relación existente entre ambas y de forma general del escurrimiento fluvial; por lo que al adicionar el represamiento de aguas fluviales (factor de impacto perenne), este escenario justificaría el incremento de la salinidad durante el periodo reciente 2006-2016, respecto a 1959-1970, y sobre todo el aumento en primavera y verano.

Hernández-Zanuy *et al.* (2009) enmarcan la salinidad promedio del GB en 36,37 para el periodo 1959-2005, con máxima de 40,90 y mínima de 18,80 en zonas bajas costeras; no obstante, durante este estudio del periodo reciente 2006-2016, la salinidad media total del GB, además de un incremento a $37,65 \pm 1,17$ con máxima de 41 al norte, mostró una amplificación espacial al registrarse valores de 39 a 40 desde la costa hacia al centro y entre 37 y 38 al sur y oeste del GB.

Según Armenteros *et al.* (2008), los cambios temporales significativos sobre las variables abióticas en los mares tropicales ocurren casi siempre bajo los efectos de eventos meteorológicos extremos (huracanes y frentes fríos); esto pudo ser así durante e inmediatamente después del paso de los huracanes “Gustav” e “Ike. Sin embargo, según el escenario lluvioso ocurrido desde finales de agosto hasta finalizar septiembre en 2008, con acumulado total de lluvia caída en todo el GB superior a 500 mm, sumado a las precipitaciones (>200 mm) de octubre 2008, hace difícil entender que la salinidad media general del golfo durante el muestreo de octubre mostrara características marinas (media de 36,1); y en contraste, en el periodo estudiado anterior al represamiento (1959-1970), de baja actividad ciclónica para la región (Fernández & Pérez 2009), la salinidad media del GB (35,4) fue significativamente inferior, con promedios generales < 34,5 en primavera y otoño. Esto sugiere dos causas posibles, (1) que independientemente de lluvias intensas, la alta retención de aguas fluviales por los embalses, canales y diques de la región suroccidental de la Isla de Cuba limita actualmente los escurrimientos fluviales al GB; y (2) ocurre una rápida restitución de las condiciones normales debido a la capacidad de mezcla y resiliencia de las aguas del golfo, cuyo tiempo de desplazamiento y renovación se plantea ocurre en aproximadamente 30 días (Emilson & Tápanes 1971).

La disminución en un 80% del caudal de los ríos de la región, además de incrementos en la salinidad aguas abajo de las presas y en el mar costero, provoca azolvamiento y acumulaciones secuenciales de sedimentos terrígenos en los deltas y zonas costeras (Piñeiro 2006), que bloquean el intercambio de agua y generan estancamiento y circulaciones antiestuarinas en ríos, lagunas y esteros de la región suroccidental de Cuba por alteración del “balance de sales” (Betanzos & Mazón-Suástegui 2014) generando incrementos de salinidad > 40 en periodos de sequía y alta evaporación.

La respuesta hidrológica ante las situaciones ambientales evaluadas, sugieren que el represamiento de aguas fluviales ha sido una causa esencial en el incremento de la salinidad general del GB, a lo que se adicionó un periodo reciente con déficit de precipitaciones (2009-2015). Esto se corroboró en las variaciones y cambios de la salinidad, entre los periodos evaluados (1959-1970 y 2006-2016), entre las estaciones climáticas y entre zonas, sobre todo en el aumento significativo del tenor halino en toda la zona oeste del GB donde se localizan ríos importantes mayormente represados. Esto no sólo ratifica el criterio de tendencia a la hipersalinidad para aguas litorales de la región suroccidental, cuyos aumentos escalonados se registran desde la década de 1990 (Piñeiro 2006), sino que lo extiende temporal y espacialmente a todo el GB.

En relación al paso de los huracanes, la temperatura del agua en diciembre 2008 y abril 2009 no mostró diferencias significativas con octubre 2008, por incidencia de frentes fríos débiles en ambos meses; sin embargo, fue evidente un restablecimiento termohalino en un corto periodo de tiempo posterior al paso de los huracanes, lo cual coincide con el criterio de Pérez-Santos (2011), que el efecto del paso de un huracán de alta intensidad en la hidrología de las aguas al sur del GB puede demorar un mes en restablecerse. Eso por supuesto estará en dependencia del panorama climático posterior al paso de estos eventos y del factor resiliencia en el GB.

Para el caso de la turbidez, ocurre una inercia o retardo en su restablecimiento a las condiciones anteriores al paso de los huracanes, debido al arrastre, dispersión y deposición de sedimentos finos, que ante cualquier turbulencia son removidos y suspendidos a la columna de agua, y distribuidos según la topografía y el efecto de los mecanismos naturales de aceleración de las corrientes marinas (Van Rijn 1984, Acker *et al.* 2004). Esto pudo justificar la diferencia y ligero incremento de turbidez en diciembre 2008 y abril 2009 (meses del periodo poco lluvioso) debido a vientos asociados a frente frío débil, respecto a agosto de 2008 y 2009 (mes del periodo lluvioso). No obstante, la máxima turbidez (17,6 FTU estación 3) registrada en octubre 2008, muestreo posterior al paso de los huracanes, fue inferior a valores obtenidos (> 20 FTU) en cuerpos de aguas marinas de la plataforma norcentral de Cuba en situaciones climáticas no extremas, y sugerido los valores > 8 FTU como de mala calidad para aguas marinas de uso pesquero (Betanzos *et al.* 2013). Esto pudiera indicar, una menor distribución de sedimentos finos y fondos blandos en la plataforma suroccidental (GB), respecto a la plataforma norcentral de Cuba, debido a una mayor abundancia de pastos marinos en el GB, los que propician su retención y reducen el transporte de sedimentos (Martínez-Daranas *et al.* 2018); sin descartar una mayor capacidad de renovación y resiliencia que en la región norcentral de Cuba.

En conclusión, ocurren diferencias significativas entre el norte y el sur del GB, en la variabilidad interanual de la temperatura del aire y la lluvia (1975-2015), que se explican en la heterogeneidad de las características locales; y aunque no hubo diferencias estadísticas significativas entre los periodos 1975-1995 (de menor actividad ciclónica) y 1996-2015 (de mayor actividad ciclónica), sí se observó un cambio en los meses de máximas precipitaciones, de la primavera al otoño, que pudiera relacionarse con la lluvia asociada al incremento posterior a 1996 de estas tormentas severas, producto de la variabilidad o cambio del clima.

El impacto perenne del represamiento, en adición a precipitaciones inferiores a la media histórica en el periodo 2009-2015, se consideran causas importantes

en el incremento termohalino del golfo de Batabanó en el periodo reciente (2006-2016), pues aún en meses con altas precipitaciones la salinidad promedio general fue superior a 36.

La temperatura media del agua se incrementó en 0,7 °C en 2006-2016 respecto a 1959-1970, y la salinidad media del golfo en 2,3, con amplificación en la distribución espacial de valores de hipersalinidad (37-41) en primavera, verano e invierno, e incremento en el tenor halino al oeste del golfo. Estos cambios o variaciones termohalinas, pueden tener un efecto negativo en la calidad de los ecosistemas y en la distribución espacial y temporal de comunidades acuáticas.

La respuesta hidrológica, inmediatamente posterior a la acción casi simultánea de los huracanes “Gustav” e “Ike”, mostró el impacto significativo de estos eventos hasta 36 días después, con restablecimiento a corto plazo en las características termohalinas y de la turbidez. La turbidez fue la única variable de las evaluadas que, 36 días posterior al paso de los huracanes, presentó valores locales indicativos de mala calidad para aguas de uso pesquero (> 8 FTU). Esto sugiere a la turbidez como una variable de peso en la evaluación del impacto de los huracanes en la hidrología del GB.

AGRADECIMIENTOS

A la empresa cubana de Estudios Marinos GEOCUBA en especial al hidrógrafo Iván Reyes Cordero, y a los tripulantes del buque de investigaciones “Cayo Largo 26”. Al Instituto Politécnico Nacional de México a través de los programas, EDI, COFFA.

LITERATURA CITADA

- Acker JG, A Vasilkov, D Nadeau & N Kuring. 2004.** Use of SeaWiFS ocean color data to estimate neritic sediment mass transport from carbonate platforms for two hurricane-forced events. *Coral Reefs* 23(1): 39-47.
- Aguirre A. 2004.** Observadores pluviométricos voluntarios: sostenibilidad de las redes Hidrológicas en Cuba. *Voluntad Hidráulica* 96: 3-9.
- Alcolado PM. 1990.** Aspectos ecológicos de la macrolaguna del Golfo de Batabanó, con especial referencia al bentos. En: Alcolado PM (ed). *El bentos de la macrolaguna del Golfo de Batabanó*, pp. 129-157. Academia, La Habana.
- Arias-Schreiber M, M Wolff, M Cano, B Martínez-Daranas, Z Marcos, G Hidalgo, S Castellanos, R del Valle, M Abreu, JC Martínez, J Díaz & A Areces. 2008.** Changes in benthic assemblages of the Gulf of Batabanó (Cuba) - results from cruises undertaken during 1981-85 and 2003-04. *Pan-American Journal of Aquatic Sciences* 3(1): 49-60.
- Armenteros M, P Willians, JB Creagh & N Capetillo. 2008.** Spatial and temporal variations of meiofaunal communities from the western sector of the Gulf Batabano, Cuba: II. Seagrass systems. *Revista de Biología Tropical* 56(1): 55-63.
- Baisre JA & Z Arboleya. 2006.** Going against the flow: Effects of river damming in Cuban fisheries. *Fisheries Research* 81: 283-292.
- Betanzos A, N Capetillo, A Lopeztegui & B Martínez-Daranas. 2013.** Variación espacio-temporal de la turbidez y calidad en cuerpos de agua marina de uso pesquero, región norcentral de Cuba, 2008-2010. *Serie Oceanológica* 12: 24-35.
- Betanzos A & JM Mazón-Suástegui. 2014.** Hidrodinámica y producción de ostión de la laguna El Cheve, sur de Pinar del Río, Cuba. *Revista Cubana de Investigaciones Pesqueras* 31(1): 45-55.
- Capetillo N, A Lopeztegui, A Betanzos & R Hernández. 2011.** Variabilidad espacial y temporal de la abundancia del erizo de mar *Lytechinus variegatus* (Lamarck, 1816) en el Golfo de Batabanó, Cuba. *Revista Cubana de Investigaciones Pesqueras* 28(2): 52-58.
- Capetillo N, J Espinosa-Sáez, A Tripp-Valdez & A Tripp-Quezada. 2016.** The impact of cyclonic activity during 1981-1985 and 2004-2009 on taxonomic diversity of mollusks in the Gulf of Batabanó, Cuba. *Hidrobiológica* 26(1): 121-131.
- Centella A, I Naranjo, I Paz, P Cárdenas, B Lapinel, M Ballester, R Pérez, A Alfonso, C González, M Limia & M Sosa. 1997.** Variaciones y cambios del clima en Cuba, Informe de resultado, 58 pp. Centro Nacional del Clima, Instituto de Meteorología, La Habana.
- Cerdeira S, S Lorenzo, A Areces & C Martínez. 2008.** Mapping of the distribution of benthic habitats in the Gulf of Batabanó using Landsat-7 images. *Ciencias Marinas* 34(2): 213-222.
- Dietrich G. 1963.** General oceanography, an introduction, 588 pp. John Wiley, New York.
- Egorov NI. 1974.** Oceanografía física, 434 pp. Guidrometoizdat, Leningrado.
- Emilsson I & JJ Tápanes. 1971.** Contribución a la hidrología de la plataforma Sur de Cuba. *Serie Oceanológica* 9: 1-31.
- Fernández A & R Pérez. 2009.** GEOCuba. Evaluación del medio ambiente cubano, 311 pp. Agencia de Medio Ambiente (AMA), Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente (CITMA), Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), La Habana.
- Fernández-Vila LJ, D López-García & O Ramírez-Stout. 2010.** Características termohalinas de las aguas de la plataforma cubana, 18 pp. Memorias del VI Taller Internacional CONyMA 2010, La Habana. [CD-ROM]
- Garcés Y, A Betanzos, A Lopeztegui & A Artiles. 2012.** Hydrological characteristics of Cienfuegos' Bay, Cuba, related to the presence of the invasive green mussel *Perna viridis*. *International Journal of Marine Science* 2(2): 12-17.
- García C, E Rodríguez, B Hernández & A Rodríguez del Rey. 1989.** Condiciones hidrometeorológicas en las plataformas cubanas. *Centro de Investigaciones Pesqueras, Reporte Técnico* 6: 1-12.
- García C, A Betanzos & JA Gómez. 1995.** Oceanografía del área de Punta del Este, golfo de Batabanó, Cuba. *Revista Cubana de Investigaciones Pesqueras* 19(1): 10-17.

- Gómez JA. 1980.** Relación entre la temperatura del aire y la maduración de langostas (*Panulirus argus*) en la plataforma suroccidental de Cuba. *Revista Cubana de Investigaciones Pesqueras* 5(4): 54-61.
- González-Ferrer S, S Lorenzo-Sánchez & S Cerdeira-Estrada. 2004.** Arrecifes coralinos. En: González-Ferrer S (ed). *Corales pétreos, jardines sumergidos de Cuba*, pp. 45-64. Instituto de Oceanología/Caja, Madrid/La Habana.
- Guerra R, ME Chávez, K Hernández & E Tristá. 2005.** Cambios sedimentarios en la cuenca marina sur de la provincia Habana. *Revista Ciencias de la Tierra y el Espacio* 1(8): 35-44.
- Hernández-Zanuy A, PM Alcolado, R Puga, B Martínez-Daranas, LJ Fernández-Vila, R Piñeiro, N Capetillo, ME de León, LS Cobas, S Lorenzo, L Busutil, H Caballero, M Esquivel, R Guerra, M Sosa, G Hidalgo & S Perera. 2009.** Evaluación de las posibles afectaciones del cambio climático a la biodiversidad marina y costera de Cuba, 145 pp. Informe Científico-Técnico del Resultado Número 2, Instituto de Oceanología, La Habana. <<http://www.redciencia.cu>>
- IPCC. 2007.** Climate change 2007: The physical science basis. In: Solomon S, D Qin, M Manning, Z Chen, M Marquis, KB Averyt, M Tignor & HL Miller (eds). *Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge / United Kingdom / New York, 996 pp.
- Lluis-Riera M. 1972.** Estudios hidrológicos del Golfo de Batabanó y de las aguas oceánicas adyacentes. *Academias de Ciencias de Cuba. Serie Oceanológica* 14: 1-49.
- Lluis-Riera M, MJ Gómez-Quintero & H Salazar-Salazar. 1987.** Datos oceanográficos de la plataforma suroccidental de Cuba y de las aguas oceánicas adyacentes, 159 pp. Academia, La Habana.
- Martínez-Canals M, M Lugioyo, S Loza, I García, ME Cesar, E Chang, S Esponda, M Sanchez & R Núñez. 2008.** Calidad ambiental en zonas de pesquerías de langosta *Panulirus argus* (Latreille, 1804) del Golfo de Batabanó, Cuba. *Serie Oceanológica* 4: 1-15.
- Martínez-Daranas B. 2009.** Caso de estudio No. 3. Estado de los pastos marinos del archipiélago Sabana-Camagüey y del Golfo de Batabanó y el cambio climático. En: Hernández-Zanuy A, PM Alcolado, R Puga, B Martínez-Daranas, LJ Fernández-Vila, R Piñeiro, N Capetillo, ME de León, LS Cobas, S. Lorenzo, L Busutil, H Caballero, M Esquivel, R Guerra, M Sosa, G Hidalgo & S Perera (eds). *Evaluación de las posibles afectaciones del cambio climático a la biodiversidad marina y costera de Cuba*, pp. 1-26. Informe Científico-Técnico del Resultado Número 2, Instituto de Oceanología, La Habana. <<http://www.redciencia.cu>>
- Martínez-Daranas B, A Betanzos-Vega, A Lopeztegui & N Capetillo-Piñar. 2018.** Características del hábitat en la zona de cría de la langosta espinosa *Panulirus argus* al este de la Isla de la Juventud, Cuba (2010-2011). *Revista de Investigaciones Marinas* 38(1): 13-32.
- Pérez-Santos I. 2011.** Variabilidad espacio-temporal del viento superficial en la Cuenca de Yucatán, Mar Caribe y sus implicaciones dinámicas: observaciones y modelos numéricos. Tesis Doctoral, Facultad de Ciencias Naturales y Oceanográficas, Universidad de Concepción, Concepción, 157 pp.
- Piñeiro R. 2006.** Influencia del aporte fluvial en la zona marina costera suroccidental del Golfo de Batabanó, Cuba. *Revista Cubana de Investigaciones Pesqueras* 24(1): 28-31.
- Piñeiro R, R Puga & G González-Sansón. 2006.** Bases para el manejo integrado del recurso langosta (*Panulirus argus*) en la zona costera sur de Pinar del Río. I. Factores ambientales. *Revista de Investigaciones Marinas* 27(3): 245-251.
- Puga R, R Piñeiro, R Alzugaray, LS Cobas, ME de León & O Morales. 2013.** Integrating anthropogenic and climatic factors in the assessment of the Caribbean spiny lobster (*Panulirus argus*) in Cuba: Implications for fishery management. *International Journal of Marine Science* 3(6): 36-45.
- Santos RMB, LS Fernandes, RMV Cortes, SGP Varandas, JJB Jesus & FAL Pacheco. 2017.** Integrative assessment of river damming impacts on aquatic fauna in a Portuguese reservoir. *Science of the Total Environment* 601/602: 1108-1118. <doi: 10.1016/j.scitotenv.2017.05.255>
- Suárez G, L Remedios & FA Casanova. 1976.** Condiciones físico químicas cerca de la boca de 18 estuarios de la región suroccidental de Cuba. Parte II. Reporte de Investigación, pp. 1-15. Centro de Investigaciones Pesqueras, La Habana.
- Suárez-Caabro J & P Duarte-Bello. 1962.** Hidrografía del Golfo de Batabanó, I: temperatura, salinidad y oxígeno. Instituto Cubano de Investigaciones Tecnológicas, Boletín Informativo 6(1): 4-19.
- Trenberth KE, PD Jones, P Ambenje, R Bojariu, D Easterling, A Klein-Tank, D Parker, F Rahimzadeh, JA Renwick, M Rusticucci, B Soden & P Zhai. 2007.** Observations: surface and atmospheric climate change. In: Solomon S, D Qin, M Manning, Z Chen, M Marquis, KB Averyt, M Tignor & HL Miller (eds). *Climate change 2007: The physical science basis*, pp. 237-336. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge / United Kingdom / New York.
- Van Rijn LC. 1984.** Sediment transport. Part I: Bed load transport. *Journal of Hydraulic Engineering* 110: 1431-1456.
- Zar J. 1984.** *Biostatistical analysis*, 718 pp. Prentice-Hall, Upper Saddle River.

Recibido 8 de noviembre de 2018 y aceptado 8 de noviembre de 2019

Editor: Claudia Bustos D.