

ARTICULO ORIGINAL

Impacto de eventos meteorológicos en el éxito reproductivo de las tortugas marinas en la Península de Guanahacabibes, Cuba

Impact of meteorological events on the marine turtles' reproductive success at Guanahacabibes Peninsula, Cuba

Julia Azanza Ricardo^{1*}
Claudia Cabrera Guerra²
Adriana Martínez Borges³
José Carlos Fernández Álvarez¹
Albenis Pérez Alarcón¹
Yoel Martínez González¹
Randy Calderón Peña³
Ryan Betancourt Avila²
Roberto Varela Montero⁴

¹Instituto Superior de Tecnologías y Ciencias Aplicadas. Universidad de La Habana, Avenida Salvador Allende 1110 e/ Infanta y Avenida Boyeros, Quinta de los Molinos, La Habana, Cuba.

²Centro de Investigaciones Marinas, Universidad de La Habana, Cuba. Calle 16, N° 117, Playa, La Habana, Cuba.

³Facultad de Biología, Universidad de La Habana, Cuba. Calle 25, N° 455, Vedado, La Habana, Cuba.

⁴Parque Nacional Guanahacabibes, ECOVIDA, Pinar del Río, Cuba.

* Autor para correspondencia:
julia_dragmarino@yahoo.es

OPEN ACCESS

Distribuido bajo:
Creative Commons CC-BY 4.0

Editor:
Beatriz Martínez-Daranas
Centro de Investigaciones Marinas.
Universidad de La Habana.

Recibido: 28.04.2021

Aceptado: 06.10.2021

Resumen

La Península de Guanahacabibes es un área altamente vulnerable al paso de ciclones tropicales. El efecto de estos eventos meteorológicos sobre la geomorfología de las costas puede afectar el área de anidación de las tortugas marinas y, por ende, su éxito reproductivo. Los objetivos de este trabajo fueron: relacionar los cambios geomorfológicos con el éxito reproductivo de las tortugas marinas y determinar la variación espacial de las variables atmosféricas durante el paso de los ciclones. Se analizó el efecto de la actividad ciclónica sobre la variación interanual del número de nidos, la distancia recorrida para anidar, el número de intentos de anidación y el éxito de eclosión de las crías. Se estimó el valor de las variables temperatura, presión y fuerza del viento durante el paso de cuatro ciclones tropicales y se evaluó el efecto en la temperatura de la arena. Además, se efectuó un levantamiento de las principales características físicas de la playa "La Barca", en la que se caracterizó espacialmente la distribución de arena el año anterior y el posterior al paso de un evento meteorológico. Se evidenciaron cambios en la distribución espacial de las características físicas de playa "La Barca", entre los años 2017 y 2019, y se analizó su posible incidencia (favorable o desfavorable) en el éxito reproductivo de las tortugas marinas. Se observó que el impacto de los ciclones es más perjudicial mientras mayor es la frecuencia e intensidad, por lo que su paso afecta el éxito de eclosión de las crías y la conducta de anidación de las hembras.

Palabras clave: ciclones tropicales, conducta de anidación, éxito de eclosión de crías.

Abstract

The Guanahacabibes Peninsula is a highly vulnerable area to tropical cyclones. The effect of these meteorological events on the geomorphology of the coasts can affect the nesting area of sea turtles and therefore their reproductive success. The objectives of this work

were: to relate the geomorphological changes with the reproductive success of the sea turtles and to determine the spatial variation of the atmospheric variables during the impact of cyclones. The effect of cyclonic activity on the inter-annual variation of the number of nests, the distance traveled to nest, the number of nesting attempts and the hatching success of the hatchlings was analyzed. The value of the variables temperature, pressure and wind force during the passage of four tropical cyclones was estimated and the effect on sand temperature was evaluated. In addition, a sampling of the main physical characteristics of "La Barca" beach was carried out, where the distribution of sand was spatially characterized the year before and after the passage of a meteorological event. Changes in the spatial distribution of the physical characteristics of "La Barca" beach were evidenced between the years 2017 and 2019, analyzing their possible incidence (favorable or unfavorable) on the reproductive success of sea turtles. It was observed that the impact of cyclones is more damaging the higher the frequency and intensity. Their passage affects the hatching success of the hatchlings and the nesting behavior of the females.

Keywords: tropical cyclones, nesting behavior, hatching success.

Introducción

Se está produciendo un incremento en la frecuencia y magnitud de fenómenos naturales, debido a los cambios en la temperatura a nivel mundial (Landsea, 1993; Goldenberg, *et al.*, 2001; Webster, *et al.*, 2005). En el caso de los ciclones tropicales, las mareas de tormenta reducen significativamente el éxito reproductivo de las tortugas marinas (Pike & Stiner, 2007a), al disminuir el número de nidos que eclosionan (Hawkes, *et al.*, 2014) y el número de neonatos que emergen de los nidos (Van Houtan & Bass, 2007). También pueden afectar los patrones de dispersión de los neonatos (DuBois, *et al.*, 2020) y adultos (Storch, *et al.*, 2006; Crowe, *et al.*, 2020) en sus desplazamientos en el mar. A largo plazo, modifican las características del área de

anidación, lo que puede condicionar la conducta de las hembras anidadoras (Long, *et al.*, 2011). Asimismo, la severidad del impacto varía con las especies (Landsea, 1993; Pike y Stiner, 2007a), debido a sus diferencias en la conducta reproductiva. La interacción de los sitios de anidación con un evento ciclónico tendrá diferentes consecuencias en dependencia de la duración, el momento de la temporada reproductiva y la selección del sitio de anidación de preferencia (según su cercanía al mar). Además, el grado de afectación varía según la ubicación geográfica de los sitios de anidación, ya que existen áreas con mayor actividad ciclónica anual, como es el caso del Atlántico noroccidental (Dewald & Pike, 2014).

La posición geográfica del archipiélago cubano favorece la existencia de una compleja distribución espacio-temporal de los procesos meteorológicos. Como resultado, se produce la combinación múltiple de procesos atmosféricos de la zona tropical y las latitudes medias (Batista & Matos, 2013). Esta confluencia se debe al efecto de factores físico-geográficos y meteorológicos, su configuración estrecha y alargada, y por estar rodeada por mares poco profundos en su plataforma y grandes volúmenes de agua en el mar Caribe, Golfo de México y el Océano Atlántico, justo en una de las zonas de alta actividad ciclónica descrita por Dewald y Pike (2014).

Las tormentas y ciclones tropicales que se producen en el mar Caribe, por lo general, atraviesan el archipiélago cubano de sur a norte, y un alto porcentaje de los mismos cruza la zona occidental del país y el estrecho de Yucatán (Pérez, *et al.*, 2013), muy próximos a la península de Guanahacabibes. Un ejemplo de esto fueron las tormentas tropicales Alberto (2006) y Nate (2017), y los huracanes Iván (2004), Wilma (2005) y Michael (2018) que ocasionaron lluvias intensas e inundaciones en el occidente de Cuba (www.insmet.cu).

Las lluvias y los vientos causados por huracanes y tormentas tropicales afectan las zonas costeras, provocan inundaciones y desplazamientos de grandes cantidades

de arena (Dewald & Pike, 2014). Estos efectos inciden negativamente en el éxito reproductivo de las tortugas marinas y pueden afectar las anidaciones de las especies (Peterson y Bishop, 2005; Moncada *et al.*, 2011).

Estudios preliminares han evidenciado los efectos que ocasionan estos eventos meteorológicos. Por ejemplo, en Cayo Anclitas (Archipiélago Jardines de la Reina), principal sitio de anidación de la tortuga verde (*Chelonia mydas* Linnaeus, 1758) en Cuba, se observaron afectaciones en la vegetación, debido a la erosión y a la disminución del número de plantas por el paso de huracanes (Moncada, *et al.*, 2011). También se han constatado severas alteraciones en playas de la Península de Guanahacabibes, causadas por huracanes que afectaron tanto la anidación como el comportamiento reproductivo de la tortuga verde en esa región (Azanza, 2009; Azanza, *et al.*, 2010). Existen evidencias, además, de pérdida de vegetación causada por el impacto de los huracanes Iván (2004) y Katrina (2005), lo cual provocó un incremento de las anidaciones en el área de vegetación profunda (Azanza, *et al.*, 2008). Dado que la Península de Guanahacabibes es un área con múltiples afectaciones por eventos meteorológicos, que han producido cambios en las características geomorfológicas en dicha zona, se plantean como objetivos del presente trabajo:

1. Relacionar los cambios geomorfológicos, ocurridos en la Península de Guanahacabibes por el paso de eventos meteorológicos, con el éxito reproductivo de las tortugas marinas.
2. Determinar la variación espacial de las variables atmosféricas asociadas al paso de huracanes por la Península de Guanahacabibes.

Materiales y métodos

Área de estudio

El trabajo se realizó en el área protegida Parque Nacional Guanahacabibes. Para cuantificar los daños de los eventos meteorológicos se tomaron en cuenta los datos del monitoreo en nueve playas, mientras que para

relacionar el efecto de las variaciones de la vegetación en el éxito reproductivo se utilizó como caso de estudio a La Barca (21°50' latitud norte y 84°46' 00" longitud oeste) por ser la playa con mayor anidación en la península. Las playas se encuentran en la porción sur de la Península, aunque tienen diferencias en su geomorfología y su orientación geográfica.

Toma de datos

Los datos se tomaron en los meses de verano del 2000 al 2020, de junio a septiembre, como parte del programa universitario de monitoreo de tortugas marinas que se lleva a cabo en la Península de Guanahacabibes (Azanza, *et al.*, 2014). La colecta de los datos se hizo según el Protocolo para el Monitoreo del Complejo de Vegetación de Costa Arenosa (Ferro, *et al.*, 2013) y el Protocolo del Programa Nacional de Tortugas Marinas (Moncada, *et al.*, 2013). Anualmente, se recogió la siguiente información sobre las hembras anidadoras y sus nidos: distancia del nido a la línea de marea alta, número de intentos de anidación en cada puesta, total de nidos por temporada y éxito de eclosión de los neonatos. El éxito de eclosión se determinó después del nacimiento del nido, y se calculó como el porcentaje de huevos eclosionados (número de cascarones dividido por el total de huevos en el nido). La distancia del nido a la línea de marea alta también fue utilizada como criterio para determinar el número de nidos afectados potencialmente por una marea de tormenta, al considerar 'afectados' a todos los nidos a distancias menores a la que avanzó el mar en la playa durante una tormenta en particular, siempre y cuando no hubieran eclosionado antes de la ocurrencia de la tormenta. Las variables meteorológicas (temperatura, presión atmosférica y velocidad del viento) analizadas en cuatro eventos meteorológicos (huracanes Wilma, Michael, Nate y Delta) se obtuvieron mediante Herramientas Numéricas para el Pronóstico de Huracanes (NTHF) que se describen más adelante. Además, se cuantificaron por año las tormentas que transitaban por las cercanías de la Península

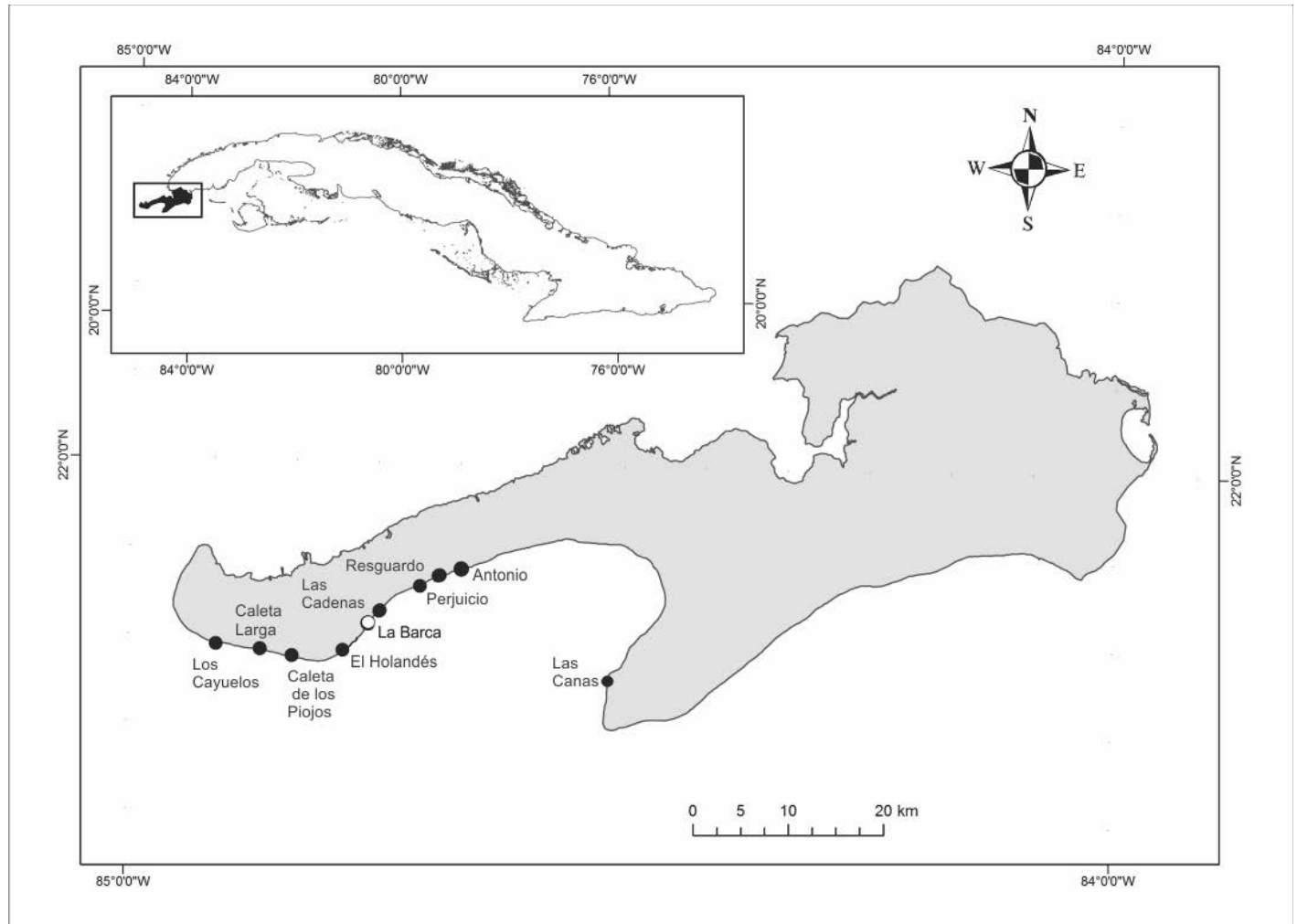


Fig. 1. Ubicación de las playas del litoral sur de la Península de Guanahacabibes seleccionadas para realizar el estudio. En blanco se destaca playa La Barca, donde se enfocaron los estudios sobre los cambios en la distribución de la vegetación ocasionados por los eventos meteorológicos.

de Guanahacabibes en el período 2000 al 2020 (24 en total).

Diseño y descripción del muestreo

Como estudio de caso La Barca, se dividió en sectores de 25 m mediante balizas (estacas de madera de 2,5 m de altura) que se ubican en la línea de vegetación (distancia variable de 20 a 40 metros) y numeradas de manera consecutiva en dirección este-oeste a partir del 0. En cada uno de estos sectores, se determinó un transecto de un metro de ancho desde la línea de marea alta

hasta la línea de balizas. A intervalos de 2 m, se determinaron las características físicas evidentes del terreno tales como: presencia de arena, rocas y/o vegetación. Posteriormente, tomando en cuenta el número de cuadrantes ocupados por vegetación y el área de cada uno, se determinó el área ocupada por vegetación a lo largo de la playa, según la metodología descrita por Cabrera-Guerra *et al.* (2021). Además, se colocaron tres sensores de temperatura (HOBO Pendant® 8K-UA-001-08) a 50 cm de profundidad en la arena, para monitorear las variaciones diarias de este parámetro durante los

meses de anidación, según la metodología de Jourdan y Fuentes (2015).

Pronóstico de ciclones tropicales

El sistema utilizado para la predicción de ciclones tropicales fue el de Herramientas Numéricas para el Pronóstico de Huracanes (NTHF). Este se encuentra implementado de forma operativa en el Departamento de Meteorología del Instituto Superior de Tecnologías y Ciencias Aplicadas de la Universidad de La Habana, durante la temporada ciclónica de la cuenca atlántica (Fernández-Álvarez, *et al.*, 2020). Está compuesto por una configuración que emplea el Hurricane Weather Research and Forecasting (HWRF), como núcleo dinámico para la solución del sistema de ecuaciones primitivas, por algoritmos computacionales, para garantizar la inicialización del modelo durante las corridas operativas con información oficial del National Hurricane Center de Estados Unidos y las salidas pronóstico del Global Forecast System, así como algoritmos de post-procesamiento de las salidas. Los análisis se extienden para plazos de 120 horas, siendo consecuentes con el plazo temporal abarcado en los pronósticos oficiales del National Hurricane Center de Estados Unidos.

La configuración del modelo se basó en las recomendaciones que realizaron Janjic *et al.* (2014) y Biswas *et al.* (2017), para las corridas operativas del HWRF en el National Centers for Environmental Prediction. Los experimentos se realizaron con dominios anidados interactivos bidireccionales con 27 - 9 km de resolución. El dominio exterior se localizó en el borde de la tormenta y el dominio interno se movió siguiendo el centro de la tormenta, durante el período de integración del modelo. Para estas corridas, se empleó el clúster de cálculo del Departamento de Meteorología. Este tiene como sistema operativo Ubuntu 14.04 con 5 nodos de cómputo Intel Core i5 de 4 procesadores físicos y 8 Gb de memoria cada uno. Las simulaciones realizadas se inicializaron para todos los casos a las 0000 UTC con las salidas del Global Forecast System a 0,5 grados

de resolución obtenidas de <https://nomads.ncdc.noaa.gov/data/gfs4/>. Para un plazo pronóstico de 72 horas, las condiciones de frontera se actualizaron cada 6 horas y el paso temporal de integración fue de 69 segundos para el dominio de 27 km y para el dominio interno estuvo en la razón 1/3 con respecto al paso temporal del dominio exterior.

Análisis de los datos

Se elaboró un gráfico de tendencia para presentar la variación espacial en el área ocupada por vegetación en los años 2017, 2018 y 2019. Se utilizó la correlación de Spearman para determinar la variación anual del número de nidos de tortuga verde y caguama (*Caretta caretta* Linnaeus, 1758) con relación al número de huracanes. Para comprobar cuánto varió el número de intentos de anidación por nido, la distancia de los nidos a la línea de marea alta y el éxito de eclosión en las temporadas de estudio, se utilizó la prueba de Kruskal-Wallis con su correspondiente prueba de comparaciones múltiples de rango. Esta última prueba sólo se realizó para tortuga verde, porque el tamaño de muestra de caguama era insuficiente. Se consideró un nivel de significación del 5%. Las pruebas se realizaron en el programa STATISTICA 7.0.

Resultados

Efecto de los eventos meteorológicos en la anidación

A lo largo del período de estudio, 24 eventos meteorológicos afectaron de manera directa o indirecta a la Península de Guanahacabibes, con un impacto variable en el éxito reproductivo de las tortugas marinas que anidan en esta zona (Tabla 1). La frecuencia anual promedio de estos eventos es de 1,2, aunque varía de períodos sin actividad (2011 al 2015) hasta años con un máximo de seis eventos, como es el caso del 2020. Se observó una relación débil y negativa entre el número de ciclones y el número de nidos por temporada para el caso de tortuga verde (Spearman, $r=-0,50$; $p=0,04$)

Tabla 1. Distribución por meses de los eventos meteorológicos que afectaron durante la temporada reproductiva de tortugas marinas en el período del 2000 al 2020 a la Península de Guanahacabibes, Cuba. Las columnas en blanco de la tabla corresponden al período de sólo anidación, en gris claro: anidación y eclosión y en gris oscuro: sólo eclosión

	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Nidos potencialmente afectados (%)					
2000				Helene		0					
2001						0					
2002				Isidore Lili		26 (13 %)					
2003		Claudette				13 (6,5 %)					
2004				Iván		81 (57 %)					
2005	Arlene				Rita Wilma	160 (55 %)					
2006	Alberto					49 (9 %)					
2007	Barry	Dean				50 (9.2 %)					
2008			Gustav	Ike		136 (23 %)					
2009						0					
2010					Paula	77 (13%)					
2011						0					
2012						0					
2013						0					
2014						0					
2015						0					
2016	Colin		Hermione			29 (9,2 %)					
2017					Nate	92 (10,1 %)					
2018					Michael	85 (37 %)					
2019						0					
2020			Laura Marco		Gamma Delta Zeta Eta	210 (46 %)					
Total de ciclones	4	0	1	1	0	4	4	3	3	4	4

 Onda tropical	 Huracán Categoría 1	 Huracán Categoría 4
 Depresión Tropical	 Huracán Categoría 2	 Huracán Categoría 5
 Tormenta Tropical	 Huracán Categoría 3	

pero no para caguama (Spearman, $r=-0,29$; $p=0,25$) (Fig. 2).

La mayor incidencia de ciclones (14) ocurrió entre los meses de septiembre y octubre, justo cuando se produce la mayoría de las eclosiones en los nidos (Tabla 1). De ellos, el 78 % fueron huracanes, mientras que en el período de junio a agosto sólo ocurrieron 10 ciclones

y el 30 % de ellos fueron huracanes. Con relación a las afectaciones a los nidos, los años 2004, 2005, 2018 y 2020 fueron los de mayor porcentaje al superar el 30 % de pérdida de los nidos.

Las características de los eventos meteorológicos, tales como su intensidad y trayectoria, determinan su impacto sobre el área de anidación. En la figura 3, se

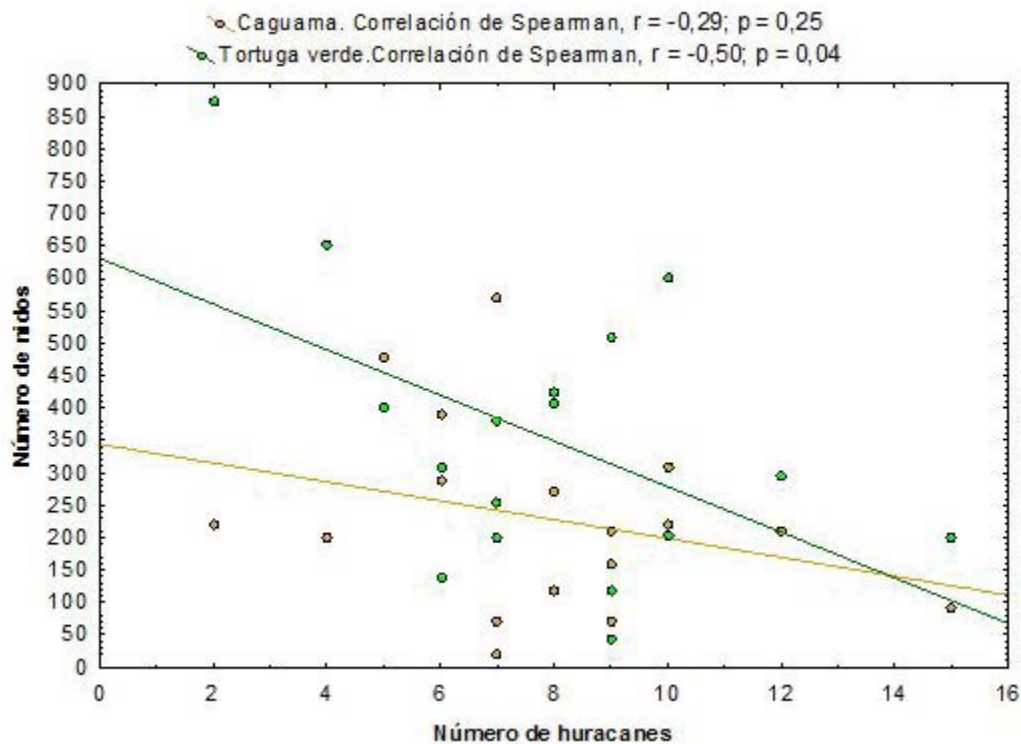


Fig. 2. Relación entre el número de nidos y la actividad ciclónica (número de huracanes) anual para la población anidadora de tortuga verde (*Chelonia mydas*) y caguama (*Caretta caretta*) de la Península de Guanahacabibes, Cuba.

muestra el predominio de trayectorias de ciclones tropicales al oeste de la Península de Guanahacabibes. La península está por completo en el área de 95% de incidencia de estos eventos, en especial, los que se originan al sur del archipiélago cubano. Tomando como estudios de caso los ciclones Wilma, Nate, Michael y Delta, se pudo verificar diferencias en las variables meteorológicas, no sólo entre los eventos sino entre playas (Fig. 4). Por ejemplo, en el caso de Wilma, el área de mayor intensidad de vientos se encontró en la parte más occidental de la península, mientras que en Nate fue la oriental. Asimismo, se puede observar que Wilma, al ser el evento más intenso, generó valores más extremos de las variables meteorológicas, con la mayor velocidad del viento (alrededor de 75 km/h como promedio), la presión con los valores más bajos (998 hPa) y la temperatura con la mayor variación (con una diferencia de

4 °C entre la máxima y la mínima). Sin embargo, no se observó el mismo gradiente en el éxito de eclosión por playas (Tabla 2), aunque sí diferencias en los valores extremos entre las playas occidentales y orientales, según la región de impacto del meteorito. Por ejemplo, luego de Michael, que presentó los valores más altos de velocidad del viento hacia el occidente, se observan valores de éxito de eclosión entre un 15 y un 20% más bajos en las playas occidentales (Caleta de los Piojos y Caleta Larga), con respecto a las orientales (Antonio, Resguardo y Perjuicio).

Los efectos que ocasionan estos meteoros en la temperatura de las playas se pueden observar con mayor detalle en la figura 5. Tomando como muestra la temporada 2020, con el mayor número de eventos meteorológicos que afectaron la península durante el período estudiado, se observa una disminución de la temperatura de la arena

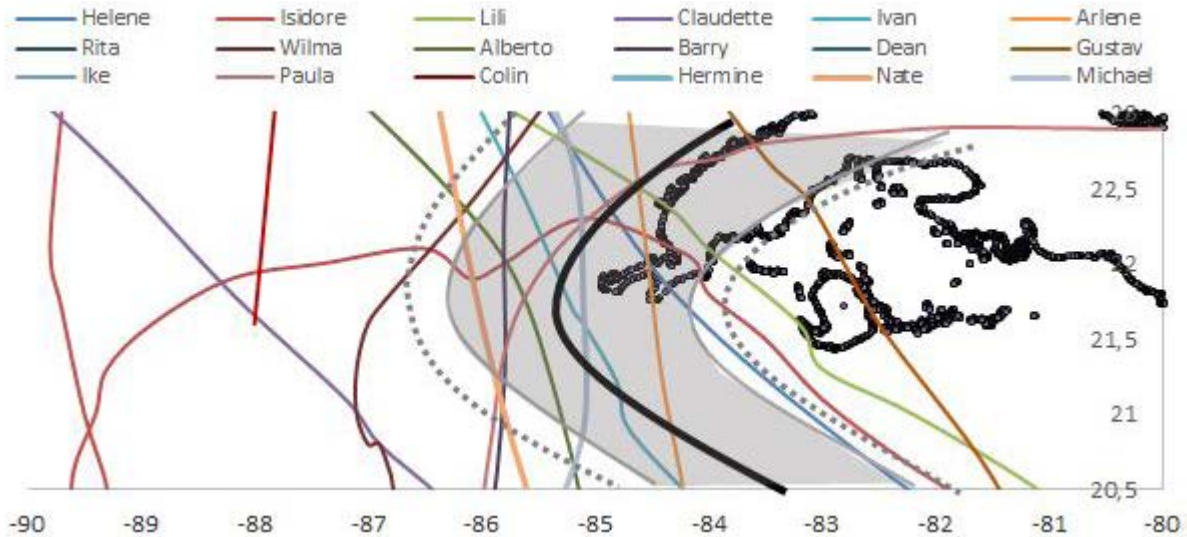


Fig. 3. Trayectoria de los ciclones tropicales que afectaron a la Península de Guanahacabibes en el período 2000-2019. La curva negra representa la trayectoria ajustada de todos estos eventos; la banda gris incluye el área de 95 % de probabilidad de ocurrencia de uno de estos eventos; las líneas grises discontinuas representan las bandas de 90 % de probabilidad de ocurrencia.

en el momento en que impactan los ciclones. Este descenso es más pronunciado cuando se suceden dos eventos en un corto período de tiempo como ocurrió con las tormentas tropicales Laura y Marcos, así como con el huracán Delta que fue precedido por la tormenta tropical Gamma. En ambos casos, la temperatura descendió

alrededor de 3°C en menos de 12 horas y no se recuperó el valor inicial hasta diez días después.

Uno de los impactos más importantes de los ciclones es sobre la selección del sitio de anidación. Los ciclones, en particular Iván, Wilma, Michael y Delta, causaron transformaciones en la morfología de las playas y su

Tabla 2. Éxito de eclosión en nidos de tortuga verde en nueve playas de la Península de Guanahacabibes tras el paso de eventos meteorológicos

Playas	E.E.±D.E. (n)			Nidos en la playa/ Total anidación (%)				Nidos analizados/ Nidos en playa (%)			
	Nate	Michael	Delta	Wilma	Nate	Michael	Delta	Wilma	Nate	Michael	Delta
Antonio	87,50±5,39 (9)	60,69±38,76 (11)	57,49±43,20 (10)	38,92	40,65	52,94	42,50	0,00	14,29	40,74	28,00
Resguardo	30,84±39,14 (3)	58,06 (1)	46,67±37,53 (3)	29,50	25,00	40,00	65,00	0,00	35,00	25,00	16,67
Perjuicio	29,95±43,99 (4)	62,17±49,76 (3)	7,67±2,52 (3)	21,05	41,18	0,00	57,50	0,00	42,86	0,00	42,86
Las Cadenas	39,44±27,41 (3)	*	66,60±37,11 (26)	*	25,00	*	35,00	*	35,00	*	28,89
La Barca	88,44±7,96 (18)	59,24±31,42 (10)	47,00±33,42 (3)	26,60	50,20	59,52	37,50	0,00	14,63	20,00	36,00
El Holandés	43,35±33,23 (24)	58,14±25,68 (3)	*	16,67	38,57	27,27	15,00	0,00	47,42	30,00	0,00
C.Piojos	65,48±36,16 (20)	21,28±17,04 (2)	*	33,90	39,58	23,08	18,00	0,00	35,09	46,67	0,00
C.Larga	87,52±7,72 (7)	44,61±2,59 (5)	33,33±22,19 (3)	*	42,11	48,57	35,71	*	87,50	45,45	30,00
Cayuelos	15,96 (1)	*	*	*	11,11	*	*	*	100,00	*	*

* No se colectó información

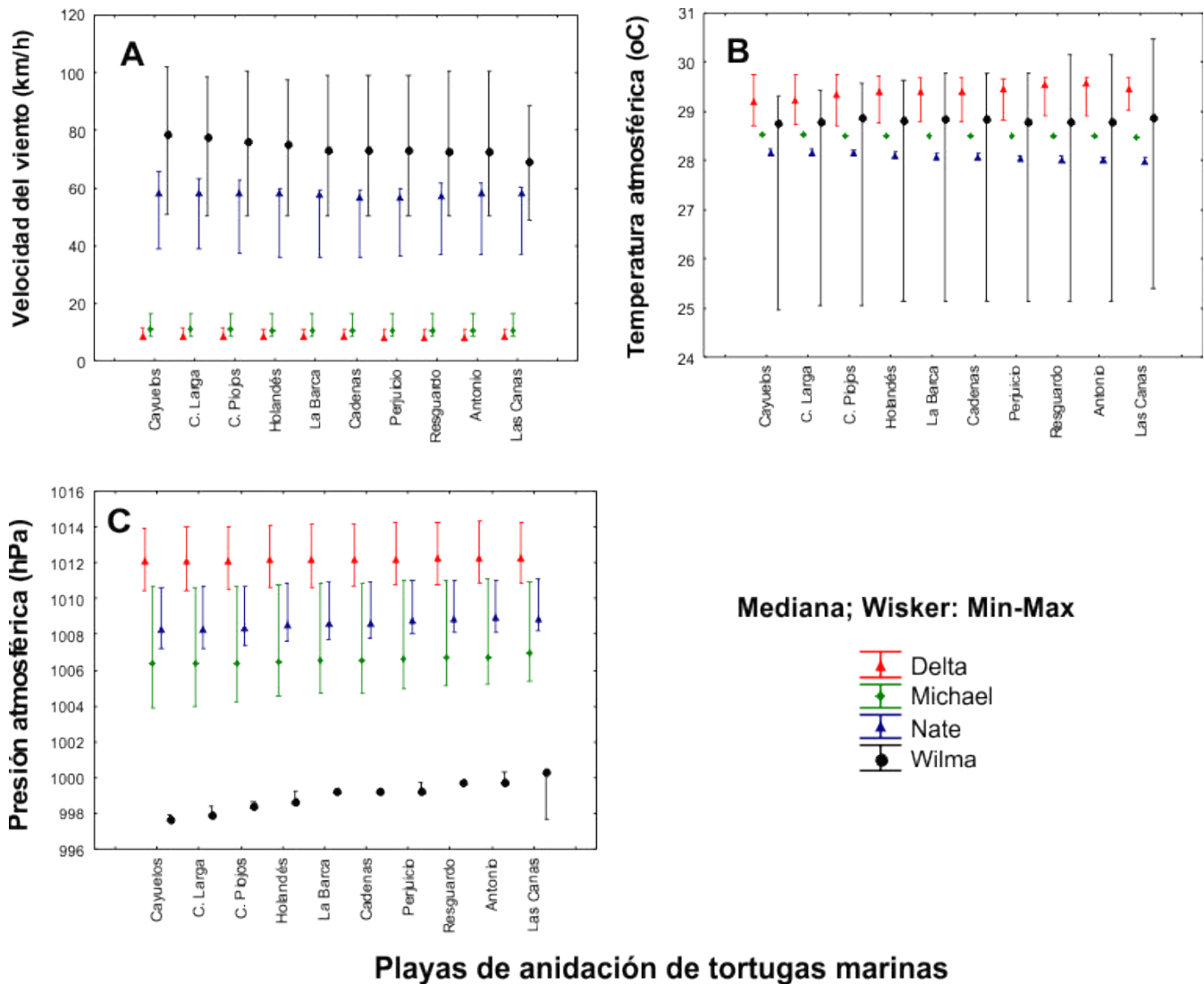


Fig. 4. Comportamiento de las variables meteorológicas en playas de anidación de tortugas marinas durante el paso de los ciclones Wilma, Nate Michael y Delta por la Península de Guanahacabibes. A: velocidad del viento; B: temperatura y C: presión atmosférica. Las playas se encuentran ordenadas en dirección oeste-este.

efecto más relevante fue la pérdida parcial o total de la franja de vegetación. Como estudio de caso, se evaluaron las diferencias detectadas en el área cubierta por vegetación en playa La Barca, entre el 2017 y el 2019, a partir de los efectos del huracán Michael (Fig. 6). En el año 2017, se observa un máximo en la cobertura de vegetación entre los 25 y los 35 metros de distancia desde la línea de marea alta, aunque se evidencia el desarrollo de otra franja secundaria entre los 8 y los 20 metros.

Esta franja aumenta su cobertura en el 2018 pero desaparece en el 2019, después del paso del huracán. En esta temporada, la vegetación de la primera franja desaparece lo que demuestra el impacto del evento meteorológico sobre la geomorfología de la playa.

Los cambios que genera en las playas el paso de los eventos meteorológicos de gran intensidad repercute en la conducta de anidación de las tortugas marinas. En particular, se evidencia un cambio importante en la

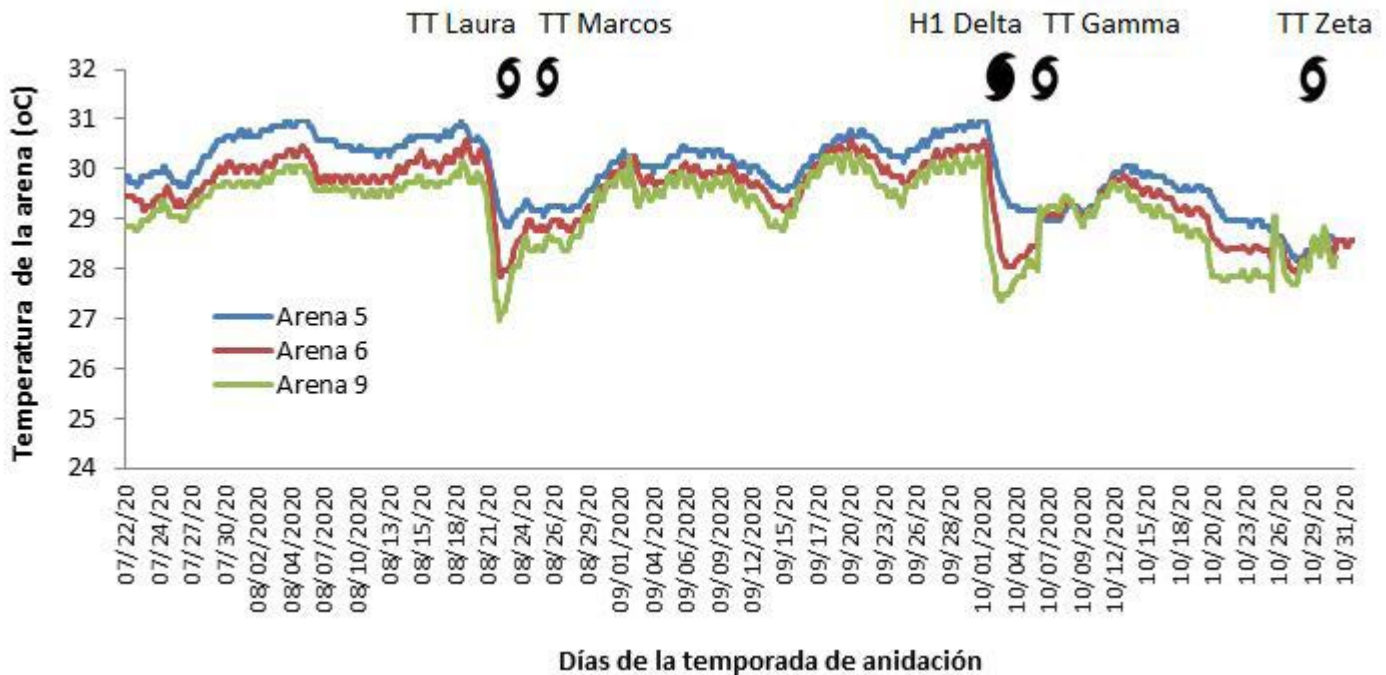


Fig. 5. Comportamiento de la temperatura de la arena en la Península de Guanahacabibes desde el pico de la temporada reproductiva (segunda quincena de julio) hasta el 31 de octubre del 2020. Se muestra el momento del impacto de cinco ciclones en la zona. Arena 5, 6 y 9: sensores de temperatura colocados a 50 cm de profundidad en la arena.

distancia recorrida para anidar por la tortuga verde, a partir de estos eventos, como se observó en La Barca a partir de los años 2004 y 2017 (Fig. 7).

Hasta el año 2004, la máxima distancia recorrida por las hembras no superó los 20 metros, en cambio, a partir del 2005, la distancia promedio recorrida fue de 25 metros. Con el crecimiento progresivo de la vegetación los valores medios van descendiendo con las temporadas hasta el paso de Michael en 2018. Debido a la desaparición de la primera franja de vegetación, se vuelve a incrementar en el 2019 la distancia promedio recorrida hasta 25 metros. Es necesario señalar que es a partir de esta distancia que se incrementa el área cubierta por vegetación en playa La Barca, como se mostró en la figura 6. En caguama, el cambio no es significativo ni las distancias recorridas son tan grandes, pero se evidencia un incremento de 5 a 10 m en los recorridos posteriores al paso de los huracanes.

Los cambios en las playas también dificultan el proceso de anidación, es por ello que se observó un incremento en el número de intentos hasta alcanzar la anidación efectiva en los años posteriores al paso de ciclones tropicales (Fig. 8). Esto sucede para las dos especies estudiadas, aunque es más marcado en tortuga verde. Por ejemplo, antes del paso de Iván en el 2004, el máximo de intentos registrados en la playa era de 8 y, a partir del 2005, aumentó a 9 e incluso a 11 en años posteriores. La misma variabilidad se observa después del paso de Maickel en el 2018, ya que en la temporada siguiente se registró un máximo de 12 intentos de anidación.

De forma similar, se encontraron diferencias temporales en el éxito de eclosión de las crías (Fig. 9). En el caso de tortuga verde, el éxito de eclosión promedio en el período sin actividad ciclónica (2009-2014) es el más elevado ($76,82 \pm 33,79$), seguido por el período con

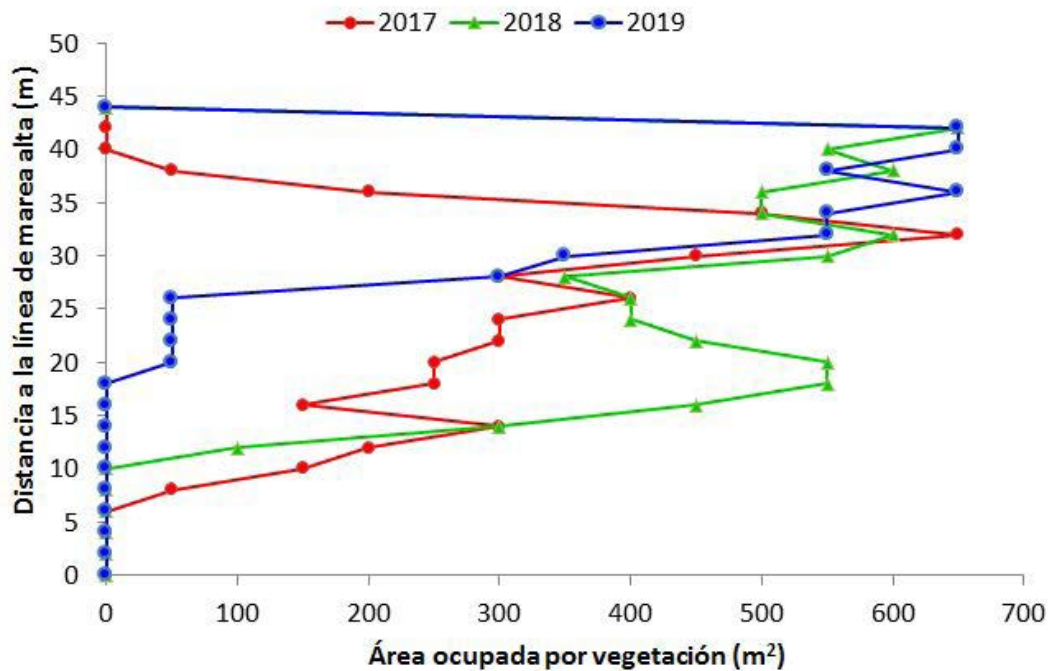


Fig. 6. Distribución del área cubierta por vegetación en playa La Barca entre los años 2017 y 2019.

poca actividad ($70,44 \pm 26,47$), mientras que los períodos con una elevada actividad ciclónica (2003-2008 y 2015-2020) tuvieron valores más bajos ($47,95 \pm 41,57$ y $57,02 \pm 41,30$, respectivamente). En caguama, en cambio, el valor promedio en cada período no varió según la actividad ciclónica, ya que, aunque el mayor valor se registró en el período sin actividad ciclónica ($81,21 \pm 19,82$), el promedio durante el período 2004 al 2008 fue similar ($81,23 \pm 16,26$). Para esta especie, los valores mínimos se registraron en el período con poca actividad ciclónica (2000-2002: $67,33 \pm 26,14$) seguido por el período 2015 al 2020 ($70,71 \pm 33,79$).

Discusión

La ubicación de la Península de Guanahacabibes en un área reconocida por su gran actividad ciclónica (Dewald & Pike, 2014), implica que el impacto de estos fenómenos sobre las tortugas marinas que anidan en dicho sitio es superior y, por tanto, debe ser evaluado en profundidad. Esto se confirma con los resultados

alcanzados que indican una actividad ciclónica (1,2 ciclones/año) superior al promedio descrito en la literatura, que es de 0,5 (Dewald & Pike, op cit.). Este alto riesgo se confirmó con el análisis probabilístico, ya que todas las áreas de anidación dentro de la Península tienen una elevada probabilidad de ser afectadas por un evento meteorológico.

De igual importancia es el hecho de que la mayor actividad e intensidad de los eventos meteorológicos se concentran en los meses de septiembre y octubre, cuando se produce la eclosión de la mayoría de los neonatos en el área. Pike y Stiner (2007b) encuentran que en los años en los que las tormentas tropicales ocurrieron al inicio de la temporada reproductiva, hubo menor éxito reproductivo. En el presente estudio se constató que las primeras tormentas tropicales tuvieron calificaciones más bajas en la escala Saffir-Simpson que las que ocurrieron a final de la temporada, por lo que las modificaciones de la geomorfología de las playas y el número de nidos afectados por la marea de tormenta fueron

menores. En el caso de las afectaciones a la playa, la marea de tormenta no sobrepasó los primeros 10 metros de la playa, fundamentalmente la anteplaya, donde es normal la interacción con el mar y no hay vegetación. De esta forma, el éxito de eclosión de los nidos incubados en el mes de junio como promedio es de $84,09 \pm 19,44$ %, mientras que los nidos que eclosionan a partir de septiembre tienen un éxito de eclosión promedio de $76,13 \pm 32,81$ %. Por otro lado, al principio de la temporada hay un menor número de nidos incubándose en la playa (menos del 20 % de la anidación total) que al final de la misma, lo que reduce las afectaciones.

A las condiciones desfavorables en la ubicación geográfica de la isla se suman las diferencias entre las playas, debido a la magnitud de la afectación. La mayoría de las tormentas que inciden sobre Guanahacabibes tienen mayor impacto en el extremo occidental. Esto se verificó mediante los gradientes de occidente a oriente que se observaron en las variables meteorológicas, en particular, en el caso de los eventos de mayor magnitud. Milton *et al.* (1994) reportaron que la marejada ciclónica asociada con el huracán produjo la mortalidad de nidos más alta debido a la inundación. Ellos encuentran que el mayor efecto de surgencia se sintió en

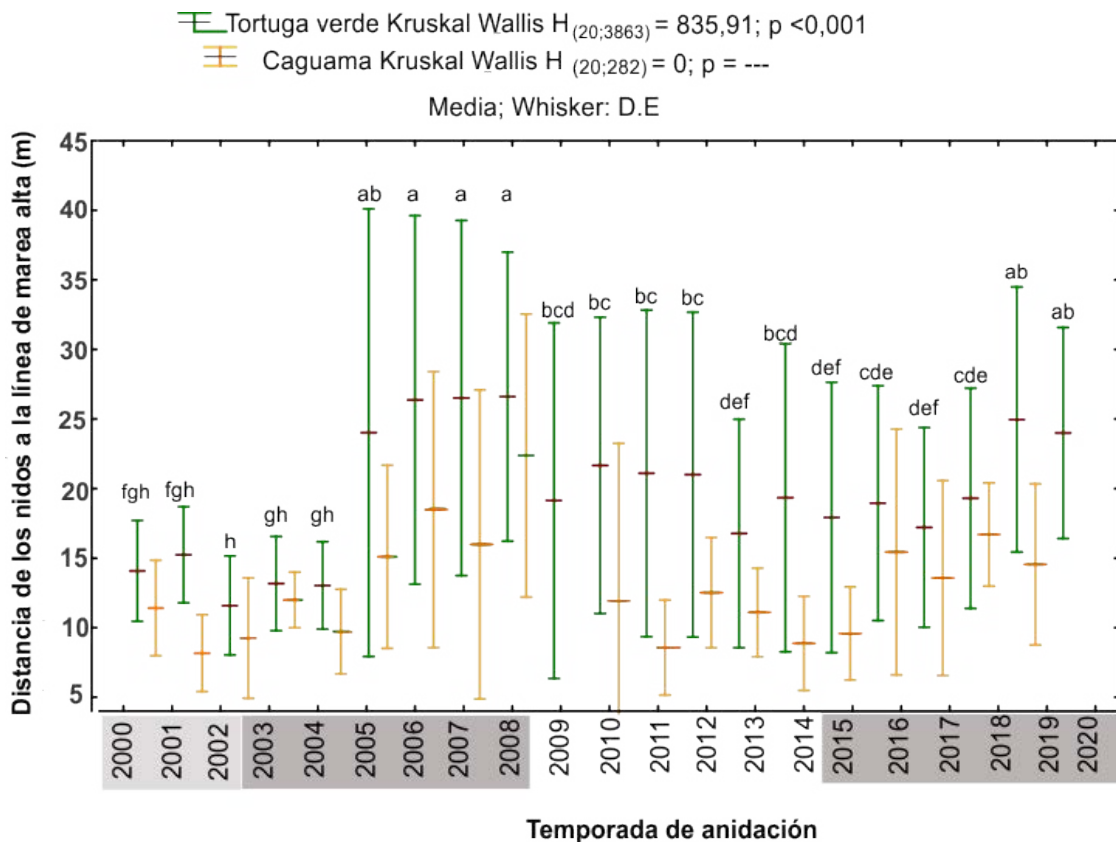


Fig. 7. Distancia de los nidos de tortuga verde y caguama con relación a la línea de marea alta durante las temporadas 2000-2020 para playa La Barca, Península de Guanahacabibes. El período de estudio se clasificó en tres categorías de acuerdo a la actividad ciclónica: en blanco, período sin actividad ciclónica, en gris claro, período con sólo uno o dos ciclones y en gris oscuro el período con alta actividad ciclónica (más de dos ciclones o al menos uno de gran intensidad). Letras iguales indican grupos homogéneos en la prueba de comparaciones múltiples de rango.

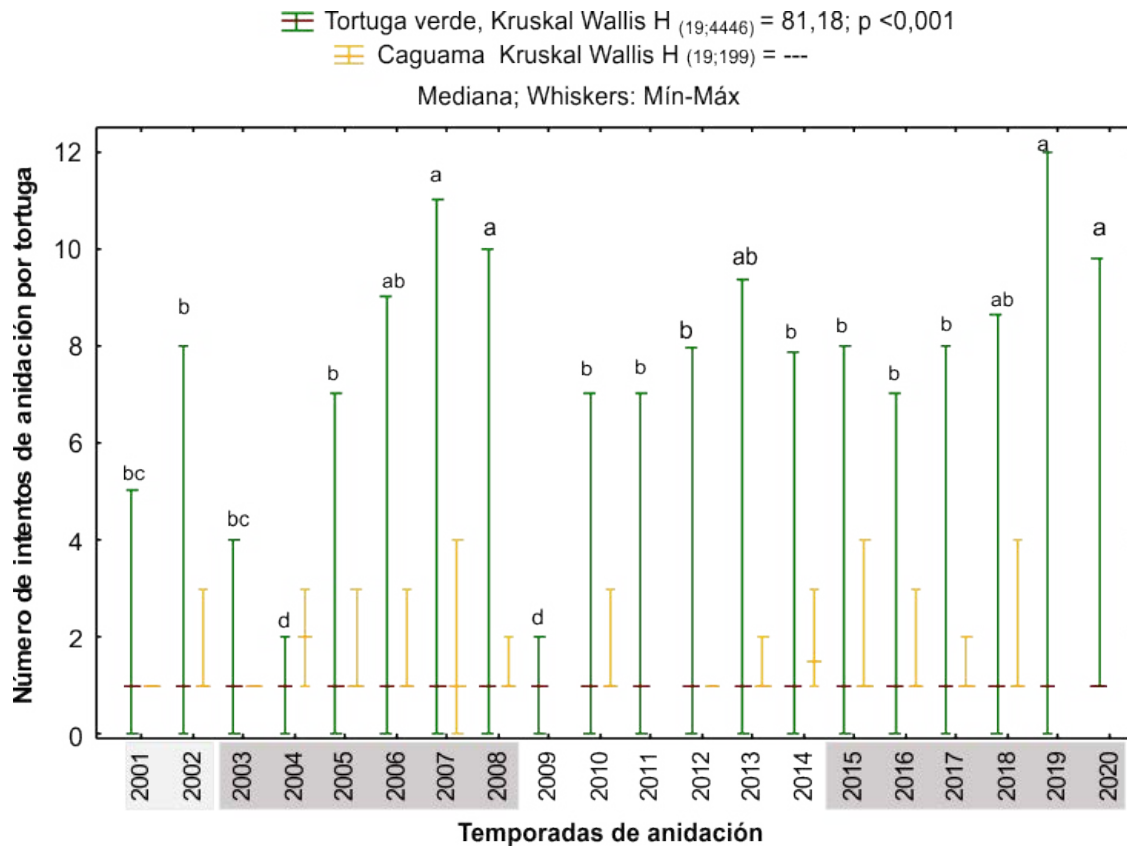


Fig. 8. Número de intentos de anidación por especie durante las temporadas 2001-2020 en la Península de Guanahacabibes a partir del inicio del programa de marcación de hembras anidadoras. La clasificación de acuerdo a la actividad ciclónica similar a la figura 7. Letras iguales indican grupos homogéneos en la prueba de comparaciones múltiples de rango.

las playas más cercanas al "ojo" del huracán, donde la mortalidad de los huevos fue del 100%. En cambio, en las áreas más alejadas del "ojo", el ascenso del mar fue menor y la mortalidad disminuyó proporcionalmente. Esto confirma el hecho de que las afectaciones no son homogéneas en toda el área para una tormenta determinada, lo cual se pudo verificar en el comportamiento de las variables meteorológicas (Ej. Wilma: $\Delta F_{viento} = 13,3 \text{ km/h}$; $\Delta T = 1,14 \text{ }^\circ\text{C}$ y $\Delta P_{atmosférica} = 2 \text{ hPa}$) y las diferencias en el éxito de eclosión entre playas observadas en la Península de Guanahacabibes (más de un 20 % de diferencia entre playas occidentales y orientales).

Del mismo modo, los eventos climáticos severos afectan a la biodiversidad de manera diferencial. Incluso,

especies cercanas evolutivamente como las tortugas marinas pueden reaccionar o ser perturbadas de manera distinta por estos fenómenos meteorológicos (Pike & Stiner, 2007a). El momento en que ocurre la temporada reproductiva de cada especie está estrechamente relacionado con el impacto que tendrán las tormentas sobre sus nidos. Pike y Stiner (2007a) encuentran que la tortuga verde es más afectada por las tormentas que la caguama, por anidar entre junio y septiembre, en el medio de la temporada ciclónica. Incluso, anticipan que el éxito de caguama podría aumentar si a consecuencia del cambio climático anida más tempranamente, ya que la alejaría aún más del período de impacto de tormentas tropicales. Los resultados de la presente investigación

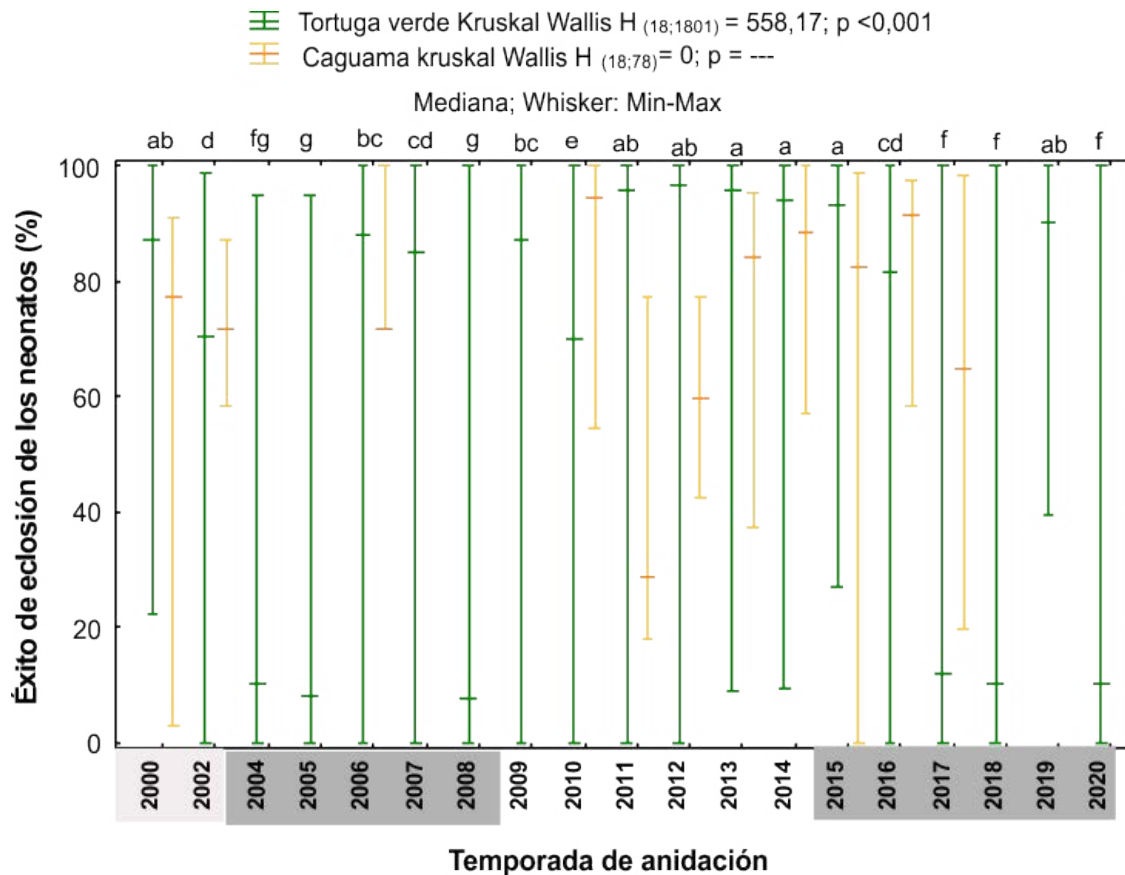


Fig. 9. Comportamiento del éxito de eclosión de los neonatos por especie durante las temporadas 2000-2020 en la Península de Guanahacabibes. La clasificación de acuerdo a la actividad ciclónica similar a la figura 7. En los años 2001 y 2003 no fue posible hacer el análisis de nidos. Letras iguales indican grupos homogéneos en la prueba de comparaciones múltiples de rango.

también manifiestan diferencias entre las especies. En Guanahacabibes, la mayor anidación de caguama se reporta entre mayo y junio (Azanza, *et al.*, 2017), mientras que para tortuga verde el pico reproductivo ocurre en julio (Azanza, *et al.*, 2013). Debido a la separación temporal en las temporadas reproductivas de las dos especies, son los nidos de tortuga verde los más afectados por los ciclones, ya que la mayoría de estos eventos meteorológicos impactan en los meses de septiembre y octubre, que es el período donde transcurre el final de la incubación de los nidos de esta especie, depositados durante el pico de anidación en el mes de julio. En cambio, la eclosión de los nidos de caguama concluye antes del momento de mayor actividad ciclónica.

Fuentes *et al.* (2019) encontraron que todas las especies de tortugas marinas fueron expuestas a ciclones en la zona continental de Estados Unidos, con variaciones en la exposición debido a la distribución espacial de las áreas de anidación de cada población, el grado de superposición temporal entre las tormentas y los eventos reproductivos, así como la ubicación de nidos en la playa. En ese estudio, las caguamas fueron las más expuestas, a diferencia de *Lepidochelys kempii* (Garman, 1880), que tuvieron la menor afectación. Asimismo, los autores destacan que es importante considerar los efectos acumulativos y sinérgicos de otros procesos climáticos y los impactos antropogénicos que pueden potenciar los efectos de los huracanes sobre las tortugas marinas.

A pesar del paso de los ciclones y sus consecuentes modificaciones en las características físicas de las playas, aún no se ha observado un impacto en el éxito de eclosión de las crías de caguama. En cambio, el éxito de eclosión de tortuga verde tiene un comportamiento diferencial en épocas de intensa actividad ciclónica, en relación con etapas de calma, con un descenso significativo en este parámetro en los años en los que impactaron ciclones, en especial, en el mes de septiembre. Las dos especies parecen responder por igual en cuanto a la distancia recorrida en la playa cuando se produce un desplazamiento en la línea de vegetación, ya que ambas tienen períodos donde el promedio de distancia recorrida para anidar es mayor, mientras que en otros anidan mucho más cerca de la línea de marea alta. Esto pudiera estar relacionado con la extensión del área de arena disponible y/o la deposición de rocas en los primeros metros de playa que dificultan la excavación. El aumento del número de rocas puede ser la causa del incremento en el número de intentos de anidación después de los cambios geomorfológicos.

Un posible beneficio del paso de estos eventos por las áreas de anidación es el descenso que produce en la temperatura de incubación. Como se evidenció en la figura 5, el paso de un evento de esta naturaleza puede reducir hasta tres grados la temperatura de la arena. Ante las altas temperaturas a la que están expuestos los nidos en Guanahacabibes (Calderón-Peña, *et al.*, 2020), un descenso de las mismas podría contribuir a incrementar la producción de machos.

En términos generales, pudiera decirse que, aunque el efecto inmediato de una tormenta puede ser devastador para los nidos presentes en el momento del impacto, según Dewald y Pike (2014) la estrategia reproductiva de las tortugas marinas (multiparidad de las hembras, la formación de cohortes reproductivas en una población y la selección del sitio de anidación con distancia suficiente del mar) les permite responder como población y no ser afectada por los efectos de los ciclones. En última instancia, es el cambio climático el que podría

alterar este equilibrio (Fuentes, *et al.*, 2019) y afectar la capacidad de resiliencia de las tortugas a largo plazo.

En términos poblacionales, la tortuga verde que anida en Guanahacabibes, que es la especie con mayor afectación potencial por los ciclones, mostró gran plasticidad en la conducta de anidación de las hembras como para poder adaptarse a los cambios geomorfológicos generados por los ciclones (cambios en la distancia recorrida y aumento en los intentos de anidación hasta conseguir sitios propicios). Así mismo, aunque los niveles de eclosión de crías descienden en los años en los que impactan los huracanes, esta población tiene un éxito de eclosión promedio superior al 85% (Calderón & Azanza, 2021), lo cual es mucho más alto que el que reportan la mayoría de las áreas de anidación. Sin embargo, la ubicación de esta área en una zona de tránsito frecuente de eventos meteorológicos, y el incremento en la frecuencia de eventos por temporada observado en los últimos años, constituye un motivo de preocupación y de seguimiento a esta temática para tener la capacidad de tomar las medidas necesarias para la conservación de la especie, como el traslado de nidos, en caso necesario.

Contribución de autores

Conceptualización, JAR; Metodología, JAR, CCG, JCFA, APA; Software, JAR, JCFA; Validación, JAR, CCG; Análisis formal, JAR, CCG; Investigación, JAR, CCG, AMB; Recursos, JAR y RBA; Curación de datos, JAR, CCG, YMG, RCP, RBA y RVM; Escritura - Preparación del borrador original, JAR, AMB, JCFA; Escritura - Revisión y edición, JAR, CCG, APA, YMG y RCP; Visualización, JAR; Administración del proyecto, JAR; Adquisición de fondos, JAR.

Agradecimientos

A todos los voluntarios que apoyaron de forma desinteresada en la toma de los datos. A Ocean Foundation, See Turtles y Chelonian Conservation Society por su apoyo financiero y equipamiento para el desarrollo

de la investigación. A la administración del Parque Nacional Guanahacabibes por el apoyo logístico y organizativo. Al Cuerpo de Guardabosques, la ODIG y entidades del Ministerio de Ciencia Tecnología y Medio Ambiente por las autorizaciones requeridas. A todas estas instituciones, además, por el apoyo logístico brindado. A los revisores anónimos y editores de la Revista del Centro de Investigaciones Marinas por sus críticas y sugerencias.

Conflicto de intereses

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses.

Referencias

- Azanza, R.J., Ibarra, M.E., Hernández, J., Díaz, R., Hernández, N. (2008). Análisis de nidos de tortuga verde (*Chelonia mydas*) durante la temporada 2006 en la península de Guanahacabibes, Cuba. *Rev. Invest. Mar.*, 29(2), 161-169.
- Azanza, R.J. (2009). *Estrategia reproductiva de la tortuga verde, Chelonia mydas, (Testudines, Cheloniidae) y su impacto en la estructura genética de áreas de anidación del occidente del archipiélago cubano*. Tesis presentada en opción al Grado Científico de Doctor, Centro de Investigaciones Marinas, Universidad de La Habana.
- Azanza, R.J., Ibarra-Martín, M. E., Hernández, J., Díaz, R. (2010). Impact of high intensity hurricanes on the reproductive biology of marine turtles' reproductive rookery of Guanahacabibes Peninsula, Cuba. En K. Dean y M.C. López Castro (Eds). *Proceeding of the Twenty-Eighth Annual Symposium on Sea Turtle Biology and Conservation. Loreto, Baja California Sur, México. NOAA Technical Memorandum NMFS-SEFSC-602*. p. 159.
- Azanza, R.J., Ibarra-Martín, M.E., González, G., Abreu, F.A., Eckert, K.L., Espinosa, G., Oyama, K. (2013). Nesting ecology of *Chelonia mydas* (Testudines: Cheloniidae) on the Guanahacabibes Peninsula, Cuba. *Int. J. Biol. Cons.*, 61(4), 1235-1945.
- Azanza, R.J., Ibarra, M.E., Cobián, D. (2014). El papel del voluntariado en la conservación de tortugas marinas en la península de Guanahacabibes, Cuba. *Rev. Invest. Mar.*, 34(1), 24-35.
- Azanza, R.J., Ibarra-Martín, M.E., González, G., Harrison, E., Medina-Cruz, Y., Bretos, F. (2017). Possible Effect of Global Climate Change on *Caretta caretta* (Testudines, Cheloniidae) Nesting Ecology at Guanahacabibes Peninsula, Cuba. *Chel. Conser. Biol.*, 16 (1), 12-19.
- Batista, T.M., Matos, F.P. (2013). ¿Realidad o incertidumbre? *Rev. Energía y tú*, 61, 29-31.
- Biswas, M.K., Carson, L., Newman, K., Bernardet, L., Kalina, E., Grell, E. (2017). *Community HWRF users' guide V3.9a*
- Cabrera-Guerra, C., Azanza-Ricardo, J., Betancourt-Ávila, R., Bretos, F, Pérez-Álvarez, P. (2021). Influence of sandy coast vegetation in the reproductive success of green turtles in Cuban nesting beaches. *Chel. Conser. Biol.*, 20(2), 1-6.
- Calderón-Peña, R., Betancourt-Ávila, R., Rodríguez-Fajardo, E., Martínez-González, Y., Azanza-Ricardo, J. (2020). Sex ratio of the green sea turtle *Chelonia mydas* (Testudines: Cheloniidae) hatchlings in the Guanahacabibes Peninsula, Cuba. *Rev. Biol. Trop.*, 68(3), 777-784.
- Crowe, L.M., Hatch, J.M., Patel, S.H., Smolowitz, R.J., Haas, H.L. (2020). Riders on the storm: loggerhead sea turtles detect and respond to a major hurricane in the Northwest Atlantic Ocean. *Mov. Ecol.*, 8(1), 1-13.
- Dewald, J.R., Pike, D.A. (2014). Geographical variation in hurricane impacts among sea turtle populations. *J. Biogeogr.*, 41(2), 307-316.
- DuBois, M.J., Putman, N.F., Piacenza, S.E. (2020). Hurricane frequency and intensity may decrease dispersal of Kemp's ridley sea turtle hatchlings in the Gulf of Mexico. *Front. Mar. Sci.*, 7, 301.
- Fernández-Álvarez, J.C., Pérez-Alarcón, A., Batista-Leyva, A.J., Díaz-Rodríguez, O. (2020). Evaluation of Precipitation Forecast of System: Numerical Tools for Hurricane Forecast. *Advan. Meteor.*, 2020, 8815949.
- Ferro, D.J., Castañeira, M.A., Menéndez, L., Guzmán, J.M. (2013). *Protocolo para el Programa de Monitoreo de Vegetación del complejo de costa arenosa en la región de los*

- Archipiélagos del Sur de Cuba*. Proyecto GEF-PNUD “Aplicación de un enfoque regional al manejo de las áreas marino-costeras en la región Archipiélagos del Sur de Cuba”. pp. 39. Centro Nacional de Áreas Protegidas, La Habana, Cuba.
- Fuentes, M.P.B., Godfrey, M.H., Shaver, D., Ceriani, S., Gredzens, C., Boettcher, R., Ingram, D., Ware, M., Wildermann, N. (2019). Exposure of Marine Turtle Nesting Grounds to Named Storms Along the Continental USA. *Rem. Sens.*, 11(24), 2996.
- Goldenberg, S.B., Landsea, C.W., Mestas-Núñez, A.M., Gray, W.M. (2001). The recent increase in Atlantic hurricane activity: causes and implications. *Science.*, 293, 474-479.
- Hawkes, L.A., Broderick, A.C., Godfrey, M.H., Godley, B.J., Witt, M.J. (2014). The impacts of climate change on marine turtle reproductive success. En B. Masio and J.L. Lockwood (eds.) *Coastal Conservation* (pp. 287-310). Cambridge University Press, Cambridge.
- Janjic, Z., Black, T., Pyle, M., Ferrier, B., Chuang, H.Y. (2014). *NMM Version 3 Modelling System User's Guide*, Developmental Testbed Center/National Centers for Environmental Prediction, College Park, MD, USA.
- Jourdan, J., Fuentes, M.M.P.B. (2015). Effectiveness of strategies at reducing sand temperature to mitigate potential impacts from changes in environmental temperature on sea turtle reproductive output. *Mitig. Adapt. Strateg. Glob. Change.*, 20(1), 121-133.
- Landsea, C.W. (1993). A climatology of intense (or major) Atlantic hurricanes. *Mon. Weather Rev.*, 121, 1703-1713.
- Long, T.M., Angelo, J., Weishampel, J.F. (2011). LiDAR-derived measures of hurricane-and restoration-generated beach morphodynamics in relation to sea turtle nesting behaviour. *Int. J. Remote Sens.*, 32(1), 231-241.
- Milton, S.L., Leone-Kabler, S., Schulman, A.A., Lutz, P.L. (1994). Effects of hurricane Andrew on the sea turtle nesting beaches of south Florida. *Bull. Mar. Sci.*, 54(3): 974-981.
- Moncada-Gavilán, F., Nodarse-Andreu, G., Azanza-Ricardo, J., Medina, Y., Martín-Viaña, Y.F. 2011. Las tortugas marinas y el cambio climático en Cuba. Cuba: Medio Ambiente y Desarrollo. *Rev. Elect. Agen. Med. Amb.*, 11(20).
- Moncada, G.F., Azanza, J., Nodarse, G., Medina, Y., Forneiro, Y., Gerhartz, J.L. (2013). *Protocolo para el monitoreo de la anidación de tortugas marinas en Cuba*. Proyecto GEF-PNUD “Aplicación de un enfoque regional al manejo de las áreas marino-costeras en la región Archipiélagos del Sur de Cuba” (pp. 84). Centro Nacional de Áreas Protegidas, La Habana, Cuba.
- Pérez, D.J., Pérez, M.B., Acosta, J.O., Flores, E.R. (2013). Caracterización de las trayectorias de los ciclones tropicales en la cuenca atlántica en relación con la actividad solar y otras variables. XI Congreso cubano de Informática y Geociencias (Geoinfo'2013). Geomática aplicada a la estimación de recursos, riesgo geológico e hidrogeología.
- Peterson, C., Bishop, M. (2005). Assessing the environmental impacts of beach nourishment. *BioScience*, 55, 887-896.
- Pike, D.A., Stiner, J.C. (2007a). Sea turtle species vary in their susceptibility to tropical cyclones. *Oecologia*, 153(2), 471-478.
- Pike, D.A., Stiner, J.C. (2007b). Fluctuating reproductive output and environmental stochasticity: do years with more reproducing females result in more offspring? *Can. J. Zool.*, 85(6), 737-742.
- Pike, D. (2009). Do Green Turtles Modify Their Nesting Seasons in Response to Environmental Temperatures? *Chel. Cons. Biol.*, 8(1), 43-47.
- Storch, S., Hays, G.C., Hillis-Starr, Z., Wilson, R.P. (2006). The behaviour of a hawksbill turtle data-logged during the passage of hurricane Georges through the Caribbean. *Mar. Freshw. Behav. Physiol.*, 39(4), 307-313.
- Van Houtan, K.S., Bass, O.L. (2007). Stormy oceans are associated with declines in sea turtle hatching. *Curr. Biol.*, 17(15), R590-R591.
- Webster, P.J., Holland, G.J., Curry, J.A., Chang, H.R. (2005). Changes in tropical cyclone number, duration, and intensity in a warming environment. *Science*, 309, 1844-1846.