



CIENCIAS NATURALES Y EXACTAS

Artículo original de investigación

Dinámica del fitoplancton en el Atlántico Norte asociada al paso de huracanes

Dailé Ávila-Alonso ^{1,2*} <https://orcid.org/0000-0001-9855-0876>

Jan M. Baetens ² <https://orcid.org/0000-0003-4084-9992>

Rolando Cárdenas ¹ <https://orcid.org/0000-0003-1266-275X>

Bernard De Baets ² <https://orcid.org/0000-0002-3876-620X>

¹ Laboratorio de Ciencia Planetaria, Departamento de Física, Universidad Central Marta Abreu de Las Villas. Santa Clara, Cuba

² Universidad de Gante, Departamento de Análisis de Datos y Modelación Matemática, Facultad de Ingeniería en Biociencias. Gante, Bélgica

*Autor para la correspondencia: daile.avilaalonso@gmail.com

RESUMEN

Introducción: El aumento de la temperatura oceánica asociado al cambio climático ha incrementado la actividad de los ciclones tropicales a nivel global. Estos fenómenos meteorológicos inducen perturbaciones fisicoquímicas en los océanos con profundas implicaciones para las comunidades de fitoplancton. Los últimos son microorganismos fotosintéticos flotantes que constituyen la base de las redes tróficas oceánicas, modulan procesos climáticos y ciclos biogeoquímicos e influyen en los rendimientos pesqueros. El presente trabajo tiene como objetivo general evaluar la respuesta del fitoplancton y sus impulsores ambientales al paso de huracanes (ciclones tropicales más intensos) en el Atlántico Norte en el período 1998-2019. **Métodos:** Se utilizaron observaciones satelitales y salidas de modelos matemáticos como fuentes de datos ya que las condiciones meteorológicas extremas asociadas a estos fenómenos limitan la adquisición de los datos de campo. **Resultados:** Se caracterizó la respuesta del fitoplancton y sus impulsores ambientales (temperatura superficial del mar, profundidad de la capa mezclada, surgencia, corrientes marinas, entre otros) al paso de huracanes en las aguas de la Zona Económica Exclusiva de Cuba, el Golfo de México y el Mar de los Sargazos. Los huracanes provocan el incremento significativo de la biomasa del fitoplancton y de la diversidad de sus comunidades en los ambientes oligotróficos del Atlántico Norte debido al incremento de la concentración de nutrientes que estimula su actividad fotosintética. El transporte horizontal de aguas costeras inducido por estos fenómenos contribuye a fertilizar los ambientes oligotróficos potenciando la conectividad ecológica en la región. **Conclusiones:** Los huracanes pueden ser considerados impulsores de la productividad y diversidad del fitoplancton en el Atlántico Norte. Los resultados obtenidos son importantes pues brindan una línea base para el desarrollo de futuras investigaciones sobre cambio climático, ecología y medio ambiente en la región.

Palabras clave: Atlántico Norte; cambio climático; fitoplancton; huracanes; nutrientes

Revisores

Alejandro Barro Cañamero
Facultad de biología, Universidad de
La Habana. La Habana, Cuba

Maickel Armenteros Almanza
Instituto de Ciencias del Mar y Limnología.
Universidad Nacional Autónoma de
México. Ciudad México, México

Editor

Lisset González Navarro
Academia de Ciencias de Cuba.
La Habana, Cuba

Traductor

Darwin A. Arduengo García
Academia de Ciencias de
Cuba. La Habana, Cuba

Phytoplankton dynamics in the North Atlantic associated with the passage of hurricanes

ABSTRACT

Introduction: The increased oceanic temperature associated with climate change has augmented the activity of tropical cyclones globally. These meteorological phenomena induce substantial physicochemical perturbations on oceans with implications for the phytoplankton communities. The latter, are drifting photosynthetic microorganisms, which are the basis of the oceanic trophic webs. Besides, they modulate climate processes, biogeochemical cycles and influence fishery yields. The general objective of this work was to assess the response of phytoplankton and their environmental drivers to the passage of hurricanes (strongest tropical cyclones) in the North Atlantic in the period 1998–2019. **Methods:** They were used satellite observations and outputs of mathematical models as data sources since the extreme meteorological conditions associated with these phenomena limit the collection of field data. **Results:** They were characterized the phytoplankton response as well as their environmental drivers (e.g., sea surface temperature, depth of the mixed layer, upwelling, marine currents) to the passage of hurricanes across the waters of the Exclusive Economic Zone of Cuba, the Gulf of Mexico and the Sargasso Sea. In general, hurricanes induce a significant increase of the phytoplankton biomass and diversity in the oligotrophic environments in the North Atlantic, due to the increased nutrient concentrations, which fuel their photosynthesis. Additionally, the horizontal transport of coastal waters induced by these phenomena leads to a fertilization of the oligotrophic environments enhancing the ecological connectivity in the region. **Conclusions:** Hurricanes can be seen as drivers of the phytoplankton productivity and diversity in the North Atlantic. The results obtained are an important baseline to guide and stimulate future research on climate change, ecology and/or environment in the region.

Keywords: North Atlantic; climate change; phytoplankton; hurricanes; nutrients

INTRODUCCIÓN

El océano cubre el 70 % de la superficie de la Tierra, siendo el hábitat más extenso de la biosfera. El fitoplancton, conjunto de microorganismos fotosintéticos flotantes, sustenta la vida oceánica al constituir la base de las cadenas tróficas. Estos organismos representan menos del 1 % de la biomasa global de productores primarios; sin embargo, son responsables de casi el 50 % de la producción primaria neta en la biosfera. ⁽¹⁾ Tienen un papel central en la ecología global, el funcionamiento de los ecosistemas, los procesos climáticos como el secuestro de dióxido de carbono atmosférico y la producción de oxígeno, los ciclos biogeoquímicos de carbono, nitrógeno, fósforo, silicio, entre otros. Además, influyen los rendimientos pesqueros.

La fotosíntesis del fitoplancton está esencialmente limitada por la disponibilidad de nutrientes y luz solar. El cambio climático modifica estos factores ambientales afectando la productividad, diversidad y estructura comunitaria. ⁽²⁻⁴⁾ Las tendencias actuales del cambio climático en el océano incluyen el incremento de la radiación solar incidente, así como el

aumento de la temperatura y de la estratificación. Esto limita el transporte vertical de aguas ricas en nutrientes desde el océano profundo hacia la superficie, conduciendo a una oligotrofización. ⁽⁴⁾ El ascenso de la temperatura superficial de los océanos ha provocado el aumento de la actividad de los ciclones tropicales (CT) ya que el océano es la principal fuente de energía para la formación e intensificación de estos fenómenos meteorológicos. ^(5,6) Esto ha sido particularmente relevante en la cuenca del Atlántico Norte donde se ha observado la mayor tendencia al incremento de la intensidad de los CT a escala mundial. ⁽⁷⁾

Los CT inducen perturbaciones fisicoquímicas en los océanos con profundas implicaciones para las comunidades de fitoplancton. ^(8,9) Los fuertes vientos de huracán provocan un enfriamiento de la superficie del mar debido al efecto combinado de la pérdida de calor en la interfaz aire-agua, la surgencia de las aguas frías de la termoclina profunda y el mezclado vertical turbulento a través de la capa mezclada. ⁽¹⁰⁾ La surgencia inducida por el huracán a lo largo de su trayectoria contribuye al transporte de aguas ricas en nutrientes desde la

nitraclina profunda estimulando la actividad fotosintética del fitoplancton en superficie. ⁽⁹⁾ Por ello, es importante entender la respuesta del fitoplancton a los huracanes, para determinar las implicaciones del cambio climático en los ecosistemas marinos en general.

Aunque el fitoplancton es de interés para las ciencias marinas, algunas áreas en el Atlántico Norte han sido poco estudiadas debido a limitaciones de datos in situ, como las aguas de la Zona Económica Exclusiva (ZEE) de Cuba. Además, los efectos de la interacción de los CT con las corrientes marinas y remolinos y la respuesta de los diferentes tipos funcionales de fitoplancton que influyen en los posibles cambios de diversidad en las comunidades son algunos temas en los que se debe profundizar en su investigación. ⁽¹¹⁾ El objetivo general de este trabajo es evaluar la respuesta del fitoplancton y sus impulsores ambientales al paso de los huracanes en la cuenca del Atlántico Norte.

MÉTODOS

Áreas de estudio y huracanes

Se seleccionaron 3 casos de estudio en función del área investigada y los huracanes analizados.

Caso 1

Se investigó la respuesta oceánica general en la ZEE de Cuba luego del paso de 18 huracanes por esta región durante el período 1998-2016. Estos fueron los huracanes: George (1998), Michelle (2001), Isidore (2002), Lili (2002), Charley (2004), Iván (2004), Dennis (2005), Katrina (2005), Rita (2005), Wilma (2005), Gustav (2008), Ike (2008), Paloma (2008), Ida (2009), Paula (2010), Tomas (2010), Sandy, (2012) y Mathew (2016). ⁽¹²⁾ El período de estudio se inicia en el año 1998 ya que este es el primer año para el cual existen observaciones satelitales de concentración de clorofila a (Chl a, variable respuesta analizada) para toda la temporada ciclónica del Atlántico (del 1 de junio-30 de noviembre).

Caso 2

Se investigó la respuesta oceánica inducida por el huracán Irma (2017) en la ZEE de Cuba y el este del Golfo de México. ⁽¹³⁾ Específicamente se estudió el efecto de este huracán en la intensificación de las corrientes marinas y la formación de 1 remolino ciclónico que impactó la circulación de las aguas ricas en Chl a en la región.

Caso 3

Se investigaron los cambios inducidos por el huracán Fabián (2003) en la diversidad de la comunidad de fitoplancton

en el Mar de los Sargazos. ⁽¹⁴⁾ La variabilidad oceanográfica (física y biológica) inducida por este huracán ha sido ampliamente investigada basada en observaciones satelitales, lo cual ofrece una base de conocimiento consistente para evaluar los resultados derivados del modelo matemático utilizado en el presente estudio. ⁽¹⁵⁻¹⁸⁾

Datos

Se utilizaron observaciones satelitales y salidas de modelos matemáticos como principales fuentes de datos. La adquisición de datos de campo estuvo limitada debido a las condiciones meteorológicas extremas provocada por los huracanes. Las observaciones satelitales se consideran fuentes de información prometedoras para estudiar la variabilidad oceanográfica inducida por estos fenómenos meteorológicos. ⁽¹⁵⁾ Dichas observaciones son apropiadas para estudiar extensas áreas oceánicas ya que proporcionan grandes cantidades de datos con una alta resolución espacial y temporal. Por otra parte, las simulaciones derivadas de los modelos matemáticos permiten obtener estimaciones tridimensionales en la columna de agua ya que las observaciones satelitales solo informan sobre las condiciones superficiales. Los modelos permiten extrapolar las escasas observaciones de campo y de laboratorio a escala regional. ⁽¹⁹⁾

Se analizó la concentración satelital de Chl a como principal variable biológica considerada un *proxy* de la biomasa del fitoplancton. ⁽²⁰⁾ El uso de las observaciones satelitales de Chl a fue posible ya que las áreas estudiadas son aguas oceánicas oligotróficas profundas, consideradas tipo óptico 1. ⁽²¹⁾ En ocasiones donde se transportaron las aguas costeras ópticamente complejas (tipo óptico 2) hacia las aguas oceánicas oligotróficas, se confirmó la presencia de fitoplancton en las mismas a través del análisis de observaciones satelitales del coeficiente de absorción del fitoplancton a 443 nm. ⁽²¹⁾ Teniendo en cuenta que los huracanes desencadenan una respuesta de abajo hacia arriba en el ecosistema oceánico, este trabajo se enfocó en la respuesta del fitoplancton al incremento de nutrientes inducido por los huracanes. ⁽²²⁾ De ahí, que los impulsores ambientales analizados estén estrechamente relacionados con la variabilidad de la concentración de nutrientes. Estos fueron: velocidad del viento, temperatura superficial del mar (SST), profundidad de la capa mezclada y de la nitraclina, eventos de surgencia, corrientes marinas, entre otros. En la Sección 3, se presentan los principales resultados relacionados con algunos de estos impulsores ambientales.

En general se utilizaron datos satelitales combinados derivados de varios radiómetros (infrarrojos y microondas), escaterómetros y altímetros, así como productos interpolados ya que estos presentan mayor cobertura espacial al mitigar

el efecto de la nubosidad y de las precipitaciones asociadas con los huracanes que afectan la teledetección satelital. ⁽²³⁻²⁵⁾ Dado que la Chl a es un pigmento fotosintético presente en todas las especies de fitoplancton, las observaciones satelitales de esta variable informan sobre la biomasa de toda la comunidad de fitoplancton en la superficie del océano. Con el objetivo de estudiar posibles cambios en la diversidad de la comunidad (caso 3) se utilizaron datos de concentración de tipos funcionales de fitoplancton derivados del modelo bioquímico de circulación general del océano del Instituto de Tecnología de Massachusetts. ⁽²⁶⁾

Metodología general

Se evaluaron las condiciones oceanográficas durante la semana previa a la tormenta (desde los 10 d previos al paso del huracán hasta 3 d antes de la entrada al área de estudio el día 0) como punto de referencia para comparar con las semanas posteriores al paso del huracán (0 d-30 d). ^(12,13) Se calcularon los valores medios diarios de los píxeles dentro de discos centrados sobre la trayectoria de los huracanes. Los resultados de los discos consecutivos fueron promediados para obtener el valor medio a lo largo de la trayectoria completa del huracán. ^(12,13) De este modo, se construyeron series de tiempo de anomalías diarias las cuales se calcularon sustrayendo el valor medio de la variable analizada, durante la semana previa a la tormenta, del valor diario (desde los 10 d previos hasta el día 30) para cada huracán. En el caso 1 se promediaron las respuestas inducidas por los 18 huracanes a lo largo de su trayectoria dentro de la ZEE de Cuba.

En el caso 3 se calculó el valor del índice de diversidad de Shannon a partir de datos de concentración de los tipos funcionales de fitoplancton diatomeas, cocolitofóridos, dinoflagelados, diazótrofos, piceoeucariotas, *Prochlorococcus* y *Synechococcus* derivados del modelo del Instituto de Tecnología de Massachusetts. ⁽²⁶⁾ Este índice se calculó expresando la proporción de la concentración de cada grupo funcional a la concentración total de la comunidad, para cada cuadrícula del modelo (18 Km x 18 km de resolución espacial), sumado sobre el total de grupos funcionales. ⁽¹⁴⁾ Estos valores de diversidad fueron promediados dentro de discos centrados a lo largo de la trayectoria del huracán Fabián. ⁽¹⁴⁾ Debido a la baja resolución temporal de estos datos (compuestos por los resultados obtenidos en 3 d) y para distinguir mejor la dinámica temporal de la diversidad de Shannon, se utilizaron datos de 3 meses, agosto (antes del paso del huracán Fabián), septiembre (durante y después de su paso) y octubre (después del paso del sistema).

RESULTADOS

Caso 1

El estudio de la variabilidad espacio-temporal de las condiciones oceanográficas en general y de las comunidades de fitoplancton, en particular en la ZEE de Cuba, ha estado restringido a algunas áreas específicas en un marco de tiempo limitado. ⁽²⁷⁾ La caracterización exhaustiva de la variabilidad estacional y a largo plazo de las condiciones oceanográficas, en el período 1998-2017, en la ZEE de Cuba se realizó como un preámbulo esencial para entender las perturbaciones inducidas por los huracanes. En este estudio se reportó que las aguas de esta región son espacialmente heterogéneas en término de sus condiciones oceanográficas. ⁽²⁷⁾ Las aguas del sur son más cálidas y menos productivas que las del norte, por la influencia del Mar Caribe. Sobre la base de estos resultados, se analizó la respuesta climatológica de la SST y la concentración de Chl a al paso de los huracanes en las aguas del norte y del sur de la ZEE de Cuba, de forma separada, considerando la presencia de este gradiente meridional (figura 1A).

La entrada del centro de los huracanes a la ZEE de Cuba (día 0) provoca una disminución máxima de la temperatura en las aguas del norte y del sur de aproximadamente 0,78 °C y 0,6 °C; respectivamente (ver figura 1B). Dicho enfriamiento se mantiene 1 mes después del paso del huracán. El paso de estos sistemas provoca incrementos considerables de la concentración de Chl a durante las 2 semanas posteriores a la tormenta (ver figura 1C). Los eventos de surgencia y mezcla vertical a través de la capa mezclada, inducidos por los huracanes, conducen al transporte de aguas frías y ricas en nutrientes desde el océano profundo hasta la superficie. Pudiera considerarse que los mismos mecanismos verticales que conducen al enfriamiento de la superficie oceánica al paso de los huracanes influyen en las floraciones de fitoplancton en este momento, sin embargo, algunas respuestas locales muestran patrones opuestos.

En la figura 2A se observa un incremento considerable de Chl a al paso de los huracanes Isidore y Lili en el año 2002, que no está asociado con valores bajos de temperatura (figura 2B). El patrón espacial de Chl a, a grandes rasgos, es consistente con el de las corrientes marinas en el área (figura 2A). Estas últimas parecen haber contribuido al transporte y dispersión de las aguas costeras ricas en nutrientes y Chl a hacia las aguas oligotróficas de la ZEE de Cuba adyacente, lo que contribuyó a la fertilización de las mismas. Se reportó que la variabilidad a largo plazo del fitoplancton en las aguas de la ZEE de Cuba está determinada por la variabilidad de la profundidad de la capa mezclada, la cual influencia

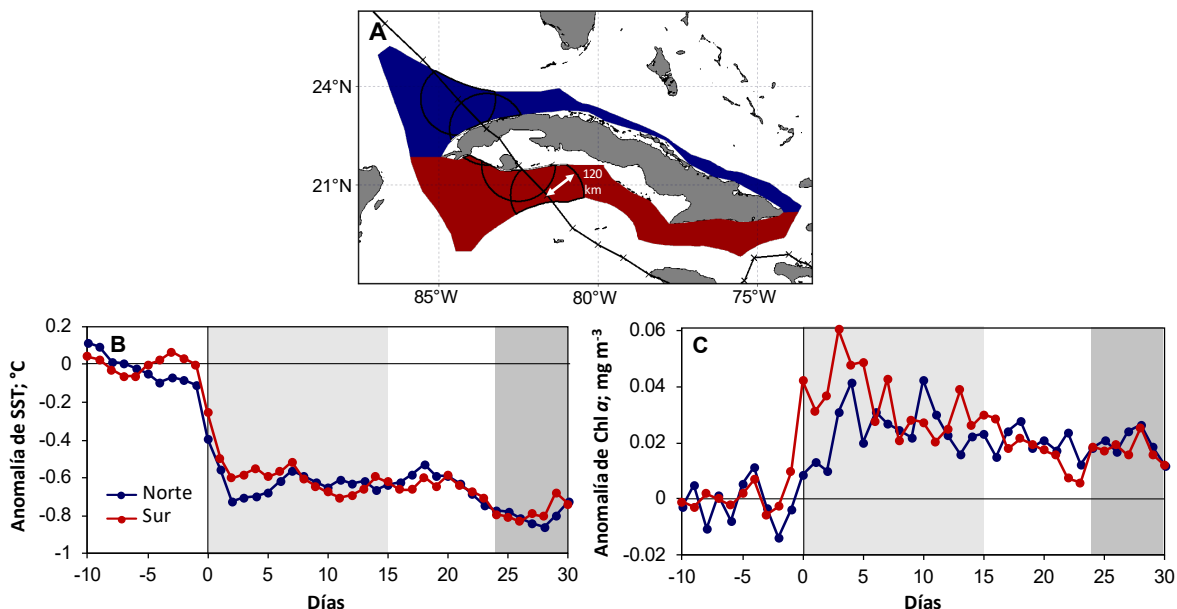


Fig. 1. A) Sectores norte y sur de la ZEE de Cuba y discos centrados en la trayectoria del huracán Gustav (2008) como ejemplo que ilustra el área estudiada a lo largo de la trayectoria de los huracanes dentro de la ZEE de Cuba B) Evolución de las anomalías medias diarias de SST. C) Concentración de Chl a a lo largo de la trayectoria de los huracanes en los sectores norte y sur de la ZEE de Cuba. Las áreas sombreadas en gris claro representan la primera y la segunda semana posterior al paso de los huracanes y la gris oscura indica la cuarta semana posterior al paso de los huracanes.

el transporte vertical de nutrientes al océano superficial.⁽²⁷⁾ Sin embargo, el transporte horizontal de aguas costeras ricas en nutrientes y Chl a hacia las aguas profundas de la ZEE de Cuba explica, en gran medida, la variabilidad de la concentración de Chl a en esta área después del paso de los huracanes. Eventos similares al presentado en la figura 2 fueron observados después del paso de varios huracanes.⁽¹²⁾

Aunque las aguas del sur de la ZEE de Cuba son menos productivas que las del norte a escala mensual y bajo condiciones meteorológicas estándar, el paso de los huracanes conduce al incremento de la concentración de Chl a en el primer sector (ver figura 1C).⁽²⁷⁾ Esta respuesta se produjo ya que la mayoría de los huracanes estudiados afectaron las aguas del sur con más intensidad y durante un mayor período de tiempo que las aguas del norte.⁽¹²⁾

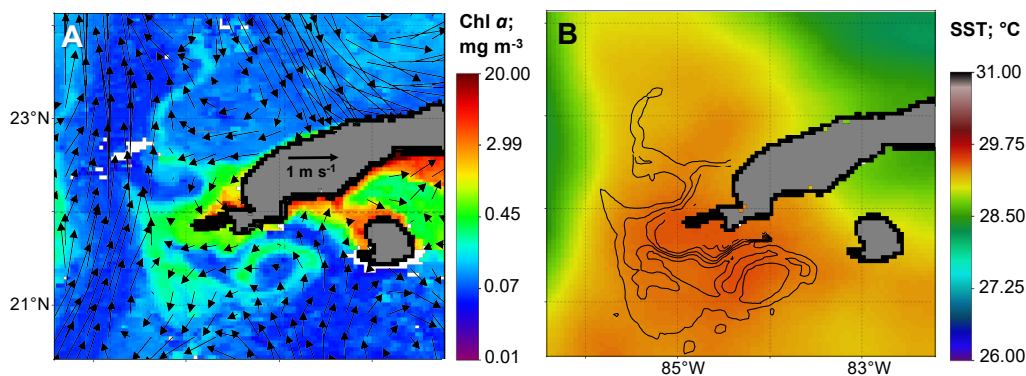


Fig. 2. A) Incremento local de la concentración satelital de Chl a (4 x 4) km resolución después del paso de los huracanes Isidore y Lili (8 de octubre de 2002) con el campo vectorial de las corrientes marinas geostroficas superpuesto derivado de observaciones de altímetro (25 x 25) km de resolución. B) SST satelital (5 x 5) km de resolución para el día correspondiente con el contorno de Chl a (0,13 mg m-3) superpuesto.

Caso 2

Después de haber finalizado el estudio del caso 1 en el verano de 2017, el huracán Irma afectó las aguas de la ZEE de Cuba y el este del Golfo de México. Este sistema meteorológico rompió varios *records* al ser el primer huracán categoría 5 que tocó tierra cubana desde el año 1924 y producir el mayor valor de energía ciclónica acumulada en el Atlántico Norte. ⁽²⁸⁾ Además de su gran intensidad, siguió una trayectoria peculiar afectando tanto aguas oceánicas como costeras, así como regiones de gran actividad de remolinos asociados a la corriente de lazo, lo cual brindó una oportunidad sin precedentes para profundizar en el estudio de la variabilidad oceanográfica inducida por los huracanes en el Atlántico Norte.

En general, Irma provocó gran variabilidad oceanográfica en la región. Promovió la extensión de una pluma de aguas ricas en Chl a que se originó en el noreste del Golfo de México y que se extendió a lo largo del este de la corriente de lazo (figura 3A y B).

La presencia de esta corriente se revela por los bajos valores de Chl a en el centro del Golfo de México (ver figura 3), lo que indica la entrada de las aguas oligotróficas del Mar Caribe. Se observa que algunos días posterior al paso de Irma, las aguas de esta pluma rica en Chl a se aproximaron a la costa noroeste de Cuba (ver figura 3C), lo cual contribuyó al incremento de la concentración de Chl a en el área.

El huracán Irma provocó un incremento de la concentración de Chl a en el noreste del Golfo de México y reforzó los mecanismos oceánicos que permitieron extender la pluma de aguas ricas en Chl a hacia el interior de esta región y la costa noroeste de Cuba. Dicho sistema intensificó las corrientes geostróficas en la región frontal de la corriente de lazo y contribuyó a la formación de un remolino ciclónico en el noreste del Golfo de México debido a los eventos de surgencias inducidos en la región. ⁽¹³⁾ Se formaron un par de remolinos (anticiclónico-ciclónico) en el noreste del Golfo de México que reforzó el transporte de las aguas costeras hacia el interior del golfo. ⁽¹³⁾

Caso 3

En los casos anteriores se evaluó la respuesta de toda la comunidad fitoplanctónica al paso de los huracanes sobre la base de la concentración satelital de Chl a. El enriquecimiento de los nutrientes inducido por estos fenómenos meteorológicos podría no impactar igualmente todos los grupos de fitoplancton dentro de la comunidad pues los mismos tienen disímiles requerimientos nutricionales en función de sus rasgos biogeoquímicos. La evaluación de la respuesta del fitoplancton al paso de los huracanes debería considerar, al menos, la respuesta individual de los principales tipos funcionales de fitoplancton, conjunto de organismos con una función bio-

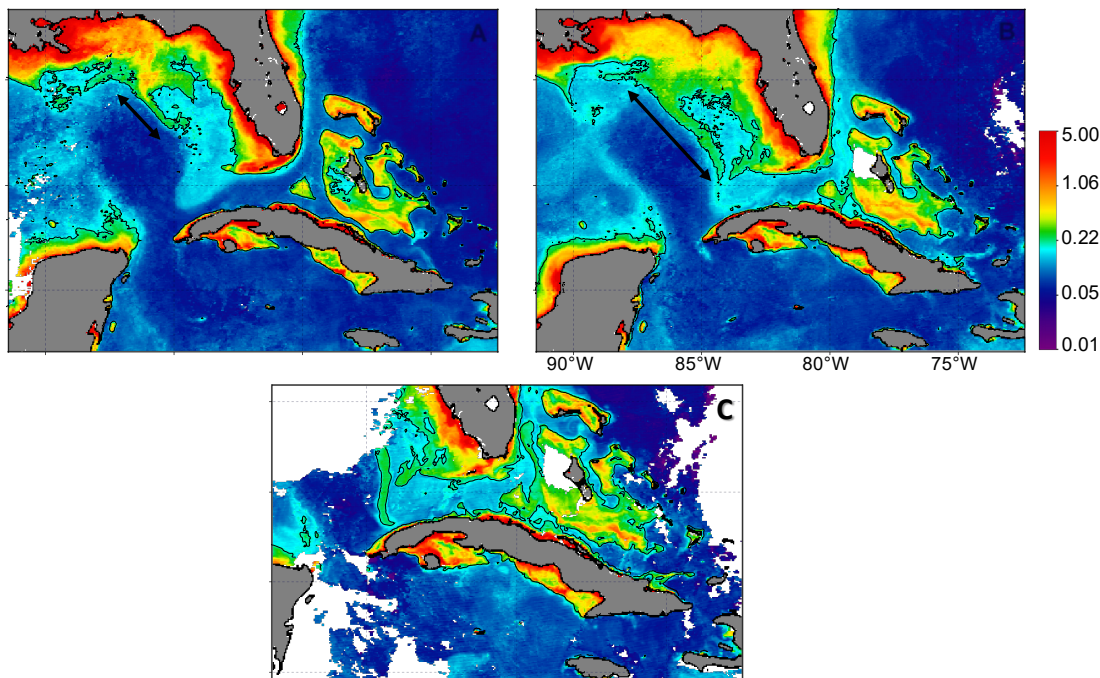


Fig. 3. A) Media semanal de concentración de Chl a la semana previa al paso del huracán Irma. B) Media semanal de concentración de Chl a 2 semanas posteriores al paso del huracán Irma. C) Incremento de Chl a el 14 de septiembre de 2017. Las líneas de contorno marcan los valores de concentración de Chl a de $0,2 \text{ mg m}^{-3}$. Los píxeles en blanco aparecen en las imágenes debido a las nubes y la cobertura satelital.

geoquímica común, para entender mejor las perturbaciones inducidas por estos fenómenos a nivel de comunidad. ⁽¹⁹⁾ Sin embargo, tales estudios han sido muy limitados y no existen antecedentes para los ambientes oceánicos del Atlántico Norte debido a la escasa disponibilidad de datos.

Los datos *in situ* son difíciles de obtener después del paso de los huracanes, al igual que las limitaciones espectrales de los actuales sensores multispectrales para derivar información teledetectada sobre la composición y diversidad de las comunidades fitoplanctónicas. ⁽²⁹⁾ En este caso de estudio se utilizaron los datos derivados del modelo biogeoquímico de circulación general del océano del Instituto de Tecnología de Massachusetts para investigar la respuesta de los tipos funcionales de fitoplancton al paso del huracán Fabián (2003) y los posibles cambios en la diversidad de la comunidad. ⁽²⁶⁾

El huracán Fabián fue muy intenso, categoría 4 de la escala Saffir Simpson, y siguió una trayectoria casi meridional en el centro del Mar de los Sargazos. Cruzó 2 provincias biogeoquímicas, la North Atlantic Subtropical Gyre (West) y la North Atlantic Tropical Gyre, (figura 4A) que presentan diferentes

condiciones oceanográficas relacionadas con su disponibilidad de nutrientes, productividad y corrientes marinas. ⁽³⁰⁾ De este modo, se evaluó la respuesta a lo largo de su trayectoria en las aguas tropicales y subtropicales por separado.

El modelo captura un incremento significativo (t -test $p < 0,05$) de la diversidad de la comunidad fitoplanctónica en las aguas tropicales al paso del huracán Fabián, pero no en las aguas subtropicales (figura 4A). Este sistema meteorológico provocó un incremento de la concentración de los tipos funcionales de fitoplancton (considerados para calcular el índice de diversidad) en las aguas tropicales, debido a un enriquecimiento de nutrientes en la zona eufótica. ⁽¹⁴⁾ Las perturbaciones oceanográficas inducidas en las aguas tropicales no provocaron un cambio significativo (t -test $p > 0,05$) en la composición de la comunidad fitoplanctónica (figura 5).

El ligero incremento de la contribución de los grupos oportunistas de crecimiento rápido (ej. diatomeas y cocolitofóridos) y la disminución de la proporción de los grupos dominantes que crecen en ambientes con limitación de nutrientes (ej. *Prochlorococcus* y *Synechococcus*) impactó la diversidad

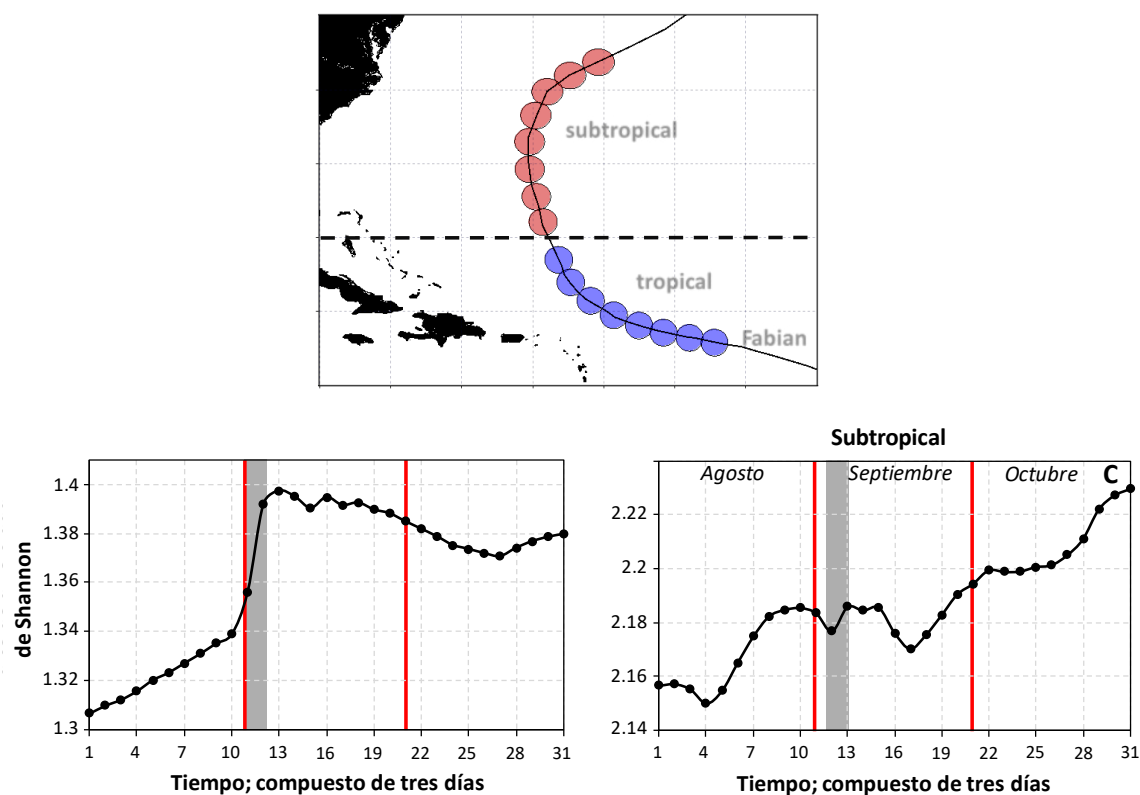


Fig. 4. Trayectoria del huracán Fabián (2003) en el Mar de los Sargazos. La línea discontinua negra separa las aguas tropicales y subtropicales de acuerdo a las provincias biogeográficas. (30) Discos de 100 km de radio centrados en la trayectoria del huracán Fabián en las aguas tropicales y subtropicales por separado. B) Evolución temporal de compuestos de 3 d del índice de diversidad de Shannon en las aguas tropicales. C) Evolución temporal de compuestos de 3 d del índice de diversidad de Shannon en las aguas subtropicales. Los diferentes valores en los ejes Y son usados para mostrar mejor la variabilidad temporal. Las líneas rojas delimitan los meses de agosto-octubre de 2003 y las áreas sombreadas en gris indican el momento en que el huracán Fabián afectó el área.

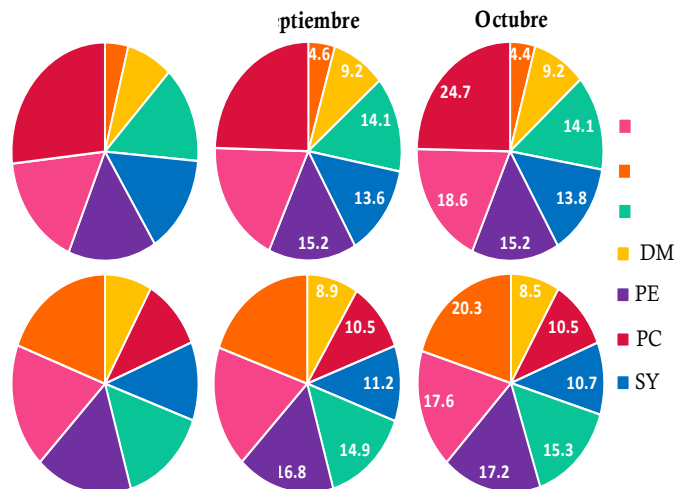


Fig. 5. Proporción de la concentración de cada tipo funcional de fitoplancton a la concentración total de fitoplancton en las aguas tropicales y subtropicales cruzadas por el huracán Fabián. Cocolitofóridos (CO), diatomeas (DT), diazotófos (DZ), dinoflagelados mixotróficos (DM), picococariotas (PE), *Prochlorococcus* (PC) y *Synechococcus* (SC).

de la comunidad en las aguas tropicales (ver figura 5).⁽¹⁴⁾ Estos leves cambios dieron lugar a la formación de una comunidad distribuida más uniformemente, que la comunidad antes del paso del huracán Fabián.

La falta de una respuesta significativa en las aguas subtropicales, cruzadas por este sistema meteorológico, estuvo determinada por limitaciones del modelo (ver figura 4C). Esto fue confirmado mediante un análisis de validación donde se compararon los datos de la SST y la Chl a derivados de este modelo con observaciones satelitales.⁽¹⁴⁾ Se observó que el modelo es sensible a capturar las respuestas más intensas inducida por el huracán Fabián en las aguas tropicales, mientras que no reproduce ninguna variabilidad significativa en las aguas subtropicales, debido principalmente a la complejidad oceanográfica en la región, la cual es impactada por la extensión hacia el este de la Corriente del Golfo y los remolinos asociados. Estudios futuros deberían mejorar el funcionamiento y rendimiento de este modelo en las aguas subtropicales del Atlántico Norte para capturar la respuesta oceánica inducida por los huracanes.

DISCUSIÓN

El moderado enfriamiento observado en las aguas de la ZEE de Cuba, al paso de los huracanes, está asociado con las propiedades térmicas de la columna de agua en general. La presencia de capas mezcladas con temperaturas muy cálidas y profundas ofrecen resistencia al forzamiento inducido por los huracanes, limitando el transporte de las aguas frías desde la termoclina profunda hacia la superficie del océano.⁽¹²⁾ El enfriamiento de la superficie del mar inducido por los huraca-

nes puede conducir a una retroalimentación negativa sobre la intensidad de estos fenómenos. Se ha reportado que el enfriamiento de más de 2,5 °C puede debilitar considerablemente los CT.⁽¹¹⁾ Sin embargo, dado el limitado enfriamiento inducido por los huracanes en las aguas de la ZEE de Cuba, las mismas presentan temperaturas óptimas para inducir la intensificación de los huracanes (temperaturas mayores a 27,5 °C) durante toda la temporada ciclónica.⁽³¹⁾

La respuesta del fitoplancton en las aguas oceánicas de la ZEE de Cuba al paso de los huracanes está determinada por procesos de transporte vertical (surgencia y mezclado) y transporte horizontal de nutrientes y aguas ricas en Chl a.⁽¹²⁾ Las concentraciones de Chl a en las aguas de la ZEE de Cuba pueden ser favorecidas por el transporte horizontal de aguas costeras provenientes de las zonas de la plataforma de la propia isla y de regiones remotas del noreste del Golfo de México.^(12,13) De este modo, se revela que los huracanes pueden tener un papel importante en la conectividad de los ecosistemas de la región con implicaciones ecológicas, tanto para el fitoplancton como para los organismos de niveles tróficos superiores y ambientales que requieren estudio futuro.

La variabilidad oceanográfica inducida por los CT impacta las comunidades tróficas marinas. Los florecimientos de fitoplancton después del paso de los huracanes conducen al incremento de la biomasa del zooplancton y peces, así como la abundancia de depredadores como aves, mamíferos marinos, entre otros.^(18,22,32) De este modo, la evaluación de la respuesta oceánica al paso de los huracanes sirve para estudios sobre la influencia de la variabilidad climática en la oceanografía pesquera en la región en general, considerando que los

cambios en las concentraciones de Chl a inducidos por los CT, pueden influenciar las tasas de sobrevivencia de larvas de recursos pesqueros y su reclutamiento a la adultez. ⁽³³⁾ La ZEE de Cuba es un área pelágica de cría larval de la langosta *Panulirus argus* (Latreille, 1804), la cual es el recurso pesquero más importante en el Caribe. ⁽³⁴⁾ Además, el Mar de los Sargazos es área de desove y cría de las anguillas *Anguilla anguilla* (Linnaeus, 1758) y *Anguilla rostrata* (Lesueur, 1817), las cuales son valiosos recursos pesqueros en el mercado europeo. Los resultados derivados ofrecen una línea base para estudios futuros que conecten el efecto del cambio climático, los huracanes y los rendimientos pesqueros en la región.

Los huracanes no solo producen un incremento de la biomasa del fitoplancton en el Atlántico Norte, sino que, el enriquecimiento de nutrientes inducidos por estos fenómenos conduce al aumento de la diversidad de la comunidad fitoplanctónica. Se considera que el aumento moderado de nutrientes en las aguas oligotróficas tropicales impacta positivamente la diversidad, al limitar la productividad exagerada de grupos oportunistas y reducir la contribución de los grupos dominantes. La disminución global de la diversidad del fitoplancton se ha proyectado para fines de siglo como resultado del efecto del cambio climático. ⁽³⁵⁾ Los resultados presentados sugieren que la variabilidad oceanográfica inducida por los huracanes podría mitigar la disminución de la diversidad del fitoplancton a nivel regional debido al incremento de la actividad ciclónica, para finales de siglo. ⁽⁶⁾

Tomando en cuenta la coherencia y consistencia de los resultados globales de esta investigación con reportes en otras áreas de estudio para condiciones ambientales similares, se confirma la idoneidad y el potencial de las observaciones satelitales y modelos matemáticos utilizados para capturar la respuesta oceánica inducida por los huracanes, lo cual valida el uso de estos conjuntos de datos para estudios futuros. ⁽¹²⁻¹⁴⁾ Este trabajo puede considerarse un punto de partida para el desarrollo de investigaciones que busquen combinar observaciones *in situ* y satelitales, así como enfoques de modelación para avanzar en la comprensión sobre los efectos de los huracanes en las comunidades de fitoplancton en el Atlántico Norte.

Conclusiones

Se presenta por primera vez la caracterización oceanográfica a largo plazo de las aguas de la ZEE de Cuba al paso de huracanes. Estos fenómenos meteorológicos provocan un débil enfriamiento de las aguas oceánicas superficiales, lo que permite la intensificación de huracanes durante toda la temporada ciclónica. La respuesta del fitoplancton en esta área es favorecida por el transporte horizontal de aguas costeras provenientes de la plataforma de la propia isla, así como

de regiones remotas del noreste del Golfo de México. Esto último, revela el papel importante de los huracanes como impulsores de la conectividad de los ecosistemas de la región. Adicionalmente, el enriquecimiento de nutrientes inducidos por los huracanes provoca el incremento significativo de la concentración de varios tipos funcionales de fitoplancton, e impacta positivamente la diversidad de la comunidad fitoplanctónica. Esto sugiere que dichos eventos meteorológicos pudieran ser considerados impulsores de la diversidad de las comunidades de fitoplancton en el Atlántico Norte tropical. Los resultados obtenidos son importantes pues brindan una línea base para el desarrollo de futuras investigaciones sobre cambio climático, ecología y medio ambiente en la región.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Field CB, Behrenfeld MJ, Randerson JT, Falkowski P. Primary production of the biosphere: integrating terrestrial and oceanic components. Science [Internet]. 1998 [citado 09 may 2022];281:237-40. Disponible en: <https://www.science.org/doi/10.1126/science.281.5374.237>.
2. Marinov I, Doney SC, Lima I D, Lindsay K, Moore JK, Mahowald N. North-South asymmetry in the modeled phytoplankton community response to climate change over the 21st century. Global Biogeochemical Cycles [Internet]. 2013 [citado 09 may 2022];27(4):1274-90. Disponible en: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/2013GB004599>.
3. Roxy MK, Modi A, Murtugudde R, Valsala V, Panickal S, Prasanna Kumar S, Ravichandran M, Vichi M, Lévy M. A reduction in marine primary productivity driven by rapid warming over the tropical Indian Ocean. Geophysical Research Letters [Internet]. 2016 [citado 09 may 2022];43:826-33. Disponible en: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/2015GL066979>.
4. Agusti S, Lubián LM, Moreno-Ostos E, Estrada M, Duarte CM. Projected changes in photosynthetic picoplankton in a warmer subtropical ocean. Frontiers in Marine Science [Internet]. 2019 [citado 09 may 2022];5:506. Disponible en: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fmars.2018.00506/full>.
5. Deo A, Ganer D, Nair G. Tropical cyclone activity in global warming scenario. Natural Hazards [Internet]. 2011 [citado 10 may 2022];59:771-86. Disponible en: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11069-011-9794-8>.
6. Seneviratne SI, Zhang X, Adnan M, Badi W, Dereczynski C, Di Luca A, Ghosh S, Iskandar I, Kossin J, Lewis S, Otto F, Pinto I, Satoh M, Vicente-Serrano SM, Wehner M, Zhou B. Weather and climate extreme events in a changing climate. En: Masson-Delmotte, V, Zhai P, Pirani A, Connors SL, Péan C, Berger S, Caud N, Chen Y, Goldfarb L, Gomis M I, Huang M, Leitzell K, Lonnoy E, Matthews JBR, Maycock TK, Waterfield T, Yelekçi O, Yu R, Zhou B. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Internet], EE. UU.: Cambridge University Press; 2021 [citado 10 may 2022], 1513-1765. Disponible en: https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_Chapter11.pdf.

7. Kossin JP, Knapp KR, Olander TL, Velden CS. Global increase in major tropical cyclone exceedance probability over the past four decades. *Proceedings of the National Academy of Sciences [Internet]*. 2020 [citado 10 may 2022];117:11975-80. Disponible en: <https://www.pnas.org/doi/10.1073/pnas.1920849117>.
8. Price JF. Upper ocean response to a hurricane. *Journal of Physical Oceanography [Internet]*. 1981 [citado 10 may 2022];11:153-75. Disponible en: https://journals.ametsoc.org/view/journals/phoc/11/2/1520-0485_1981_011_0153_uortah_2_0_co_2.xml.
9. Babin SM, Carton JA, Dickey TD, Wiggert JD. Satellite evidence of hurricane-induced phytoplankton blooms in an oceanic desert. *Journal of Geophysical Research: Oceans [Internet]*. 2004 [citado 10 may 2022];109:C03043. Disponible en: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2003JC001938>.
10. Vincent EM, Lengaigne M, Madec G, Vialard J, Samson G, Jourdain NC, Menkes CE, Jullien S. Processes setting the characteristics of sea surface cooling induced by tropical cyclones. *Journal of Geophysical Research: Oceans [Internet]*. 2012 [citado 10 may 2022];117:C02020. Disponible en: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2011JC007396>.
11. Zhang H, He H, Zhang WZ, Tian D. Upper ocean response to tropical cyclones: a review. *Geoscience Letters [Internet]*. 2021 [citado 11 may 2022];8:1. Disponible en: <https://geoscienceletters.springeropen.com/articles/10.1186/s40562-020-00170-8>.
12. Avila-Alonso D, Baetens JM, Cardenas R, De Baets B. The impact of hurricanes on the oceanographic conditions in the Exclusive Economic Zone of Cuba. *Remote Sensing of Environment [Internet]*. 2019 [citado 11 may 2022];233:111339. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S003442571930358X>.
13. Avila-Alonso D, Baetens JM, Cardenas R, De Baets B. Oceanic response to Hurricane Irma (2017) in the Exclusive Economic Zone of Cuba and the eastern Gulf of Mexico. *Ocean Dynamics [Internet]*. 2020 [citado 11 may 2022];70:603-19. Disponible en: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10236-020-01350-y>.
14. Avila-Alonso D, Baetens JM, Cardenas R, De Baets B. Response of phytoplankton functional types to Hurricane Fabian (2003) in the tropical and subtropical Sargasso Sea. *Marine Environmental Research [Internet]*. 2023 [citado 11 may 2022];190:106079. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0141113623002076>.
15. Son S, Platt T, Fuentes-Yaco C, Bouman H, Devred E, Wu Y, Sathyendranath S. Possible biogeochemical response to the passage of Hurricane Fabian observed by satellites. *Journal of Plankton Research [Internet]*. 2007 [citado 11 may 2022];29:687-97. Disponible en: <https://academic.oup.com/plankt/article/29/8/687/1491974?login=false>.
16. Black WJ, Dickey TD. Observations and analyses of upper ocean responses to tropical storms and hurricanes in the vicinity of Bermuda. *Journal of Geophysical Research: Oceans [Internet]*. 2008 [citado 12 may 2022];113:C08009. Disponible en: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2007JC004358>.
17. Price JF, Morzel J, Niiler PP. Warming of SST in the cool wake of a moving hurricane. *Journal of Geophysical Research: Oceans [Internet]*. 2008 [citado 12 may 2022];113:C07010. Disponible en: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2007JC004393>.
18. Pedrosa-Pámies R, Conte M, Weber J, Johnson R. Hurricanes enhance labile carbon export to the deep ocean. *Geophysical Research Letters [Internet]*. 2019 [citado 12 may 2022];46:10484-94. Disponible en: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2019GL083719>.
19. Follows MJ, Dutkiewicz S. Modeling diverse communities of marine microbes. *Annual Review of Marine Science [Internet]*. 2011 [citado 12 may 2022];3:427-51. Disponible en: <https://www.annualreviews.org/doi/10.1146/annurev-marine-120709-142848>.
20. Cullen JJ. The deep chlorophyll maximum: comparing vertical profiles of chlorophyll a. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences [Internet]*. 1982 [citado 12 may 2022];39:791-803. Disponible en: <https://cdnsiencepub.com/doi/10.1139/f82-108>.
21. Morel A. In-water and remote measurements of ocean color. *Boundary-Layer Meteorology [Internet]*. 1980 [citado 23 may 2022];18:177-201. Disponible en: <https://link.springer.com/article/10.1007/bf00121323>.
22. Fiedler PC, Redfern JV, Van Noord J, Hall C, Pitman RL, Ballance LT. Effects of a tropical cyclone on a pelagic ecosystem from the physical environment to top predators. *Marine Ecology Progress Series [Internet]*. 2013 [citado 23 may 2022]; 484:1-16. Disponible en: <https://www.int-res.com/abstracts/meps/v484/p1-16>.
23. Atlas R, Hoffman RN, Ardizzone J, Leidner SM, Jusem JC, Smith DK, Gombos D. A cross-calibrated, multiplatform ocean surface wind velocity product for meteorological and oceanographic applications. *Bulletin of the American Meteorological Society [Internet]*. 2011 [citado 23 may 2022];92:157-74. Disponible en: [https://journals.ametsoc.org/configurable/content/journals\\$002fbams\\$002f92\\$002f2\\$002f2010bams2946_1.xml?t:ac=journals%24002fbams%24002f92%24002f2%24002f-2010bams2946_1.xml](https://journals.ametsoc.org/configurable/content/journals$002fbams$002f92$002f2$002f2010bams2946_1.xml?t:ac=journals%24002fbams%24002f92%24002f2%24002f-2010bams2946_1.xml).
24. Donlon CJ, Martin M, Stark J, Roberts-Jones J, Fiedler E, Wimmer W. The Operational Sea Surface Temperature and Sea Ice Analysis (OSTIA) system. *Remote Sensing of Environment [Internet]*. 2012 [citado 23 may 2022];116:140-58. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0034425711002197>.
25. Garnesson P, Mangin A, d'Andon OF, Demaria J, Bretagnon M. The CMEMS GlobColour chlorophyll a product based on satellite observation: multi-sensor merging and flagging strategies. *Ocean Science [Internet]*. 2019 [citado 23 may 2022];15(3):819-30. Disponible en: <https://os.copernicus.org/articles/15/819/2019>.
26. Dutkiewicz S, Hickman A, Jahn O, Gregg W, Mouw C, Follows M. Capturing optically important constituents and properties in a marine biogeochemical and ecosystem model. *Biogeosciences [Internet]*. 2015 [citado 23 may 2022];12(3):4447-81. Disponible en: <https://bg.copernicus.org/articles/12/4447/2015/bg-12-4447-2015.html>.
27. Avila-Alonso D, Baetens JM, Cardenas R, De Baets B. Spatio-temporal variability of oceanographic conditions in the Exclusive Economic Zone of Cuba. *Journal of Marine Systems [Internet]*. 2020 [citado 24 may 2022];212(1):103416. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0924796320301123>.
28. Trenberth KE, Cheng L, Jacobs P, Zhang Y, Fasullo J. Hurricane Harvey links to ocean heat content and climate change adaptation. *Earth's Future [Internet]*. 2018 [citado 24 may 2022];6:730-

44. Disponible en: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2018EF000825>
29. Grupo Internacional de Coordinación del Color del Océano. Tipos funcionales del fitoplacton del espacio. En: Sathyendranath, S. Informes del Grupo Internacional de Coordinación del Color del Océano (IOCCG) [Internet]. No. 15. Dartmouth, Canada: IOCCG; 2014 [citado 24 may 2022]. Disponible en: <https://repository.oceanbestpractices.org/handle/11329/526>
30. Longhurst A. Seasonal cycles of pelagic production and consumption. *Progress in Oceanography* [Internet]. 1995 [citado 24 may 2022];36:77-167. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0079661195000151>
31. Fraza E, Elsner JB. A climatological study of the effect of sea-surface temperature on North Atlantic hurricane intensification. *Physical Geography* [Internet]. 2015 [citado 25 may 2022];36:395-407. Disponible en: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/02723646.2015.1066146?journalCode=tphy20>
32. Pedrosa-Pámies R, Conte M, Weber J, Johnson R. Carbon cycling in the Sargasso Sea water column: insights from lipid biomarkers in suspended particles. *Progress in Oceanography* [Internet]. 2018 [citado 25 may 2022];168:248-78. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0079661118301241>
33. Foltz GR, Balaguru K, Leung LR. A reassessment of the integrated impact of tropical cyclones on surface chlorophyll in the western subtropical North Atlantic. *Geophysical Research Letters* [Internet]. 2015 [citado 26 may 2022];42(4):1158-64. Disponible en: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/2015gl063222>
34. Kough AS, Paris CB, Butler IVMJ. Larval connectivity and the international management of fisheries. *PloS ONE* [Internet]. 2013 [citado 26 may 2022];8(6):e64970. Disponible en: <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0064970>
35. Henson SA, Cael B, Allen SR, Dutkiewicz S. Future phytoplankton diversity in a changing climate. *Nature Communications* [Internet]. 2021 [citado 26 may 2022];12:5372. Disponible en: <https://www.nature.com/articles/s41467-021-25699-w>

Conflictos de intereses

Los autores declaran que no existen conflictos de interés en relación con la investigación presentada.

Contribuciones de los autores

Conceptualización: Dailé Avila-Alonso, Jan M. Baetens

Curación de datos: Dailé Avila-Alonso

Análisis formal: Dailé Avila-Alonso, Rolando Cardenas

Adquisición de fondos: Bernard De Baets

Metodología: Dailé Avila-Alonso, Jan M. Baetens, Rolando Cardenas, Bernard De Baets

Administración del proyecto: Bernard De Baets

Supervisión: Jan M. Baetens, Rolando Cardenas, Bernard De Baets

Redacción-borrador original: Dailé Avila-Alonso

Redacción-revisión y edición: Dailé Avila-Alonso, Jan M. Baetens, Rolando Cardenas, Bernard De Baets

Financiamientos

Esta investigación fue financiada por el Fondo de Investigación Especial (BOF) de la Universidad de Gante, Bélgica (número de beca 01W03715).

Cómo citar este artículo

Avila-Alonso D, Baetens JM, Cardenas R, De Baets B. Dinámica del fitoplancton en el Atlántico Norte asociada al paso de huracanes. *An Acad Cienc Cuba* [internet] 2023 [citado en día, mes y año];13(4):e1474. Disponible en: <http://www.revistaccuba.cu/index.php/revacc/article/view/1474>

El artículo se difunde en acceso abierto según los términos de una licencia Creative Commons de Atribución/Reconocimiento-NoComercial 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0), que le atribuye la libertad de copiar, compartir, distribuir, exhibir o implementar sin permiso, salvo con las siguientes condiciones: reconocer a sus autores (atribución), indicar los cambios que haya realizado y no usar el material con fines comerciales (no comercial).

© Los autores, 2023.

Recibido: 18/08/2023

Aprobado: 20/09/2023

