

Revista Ciencias del Mar UAS



Enero - Marzo 2025

Núm. 2 Vol.2

U N I V E R S I D A D A U T Ó N O M A D E S I N A L O A



**Edición
especial
mujeres
en las ciencias
del mar**

ISSN (en trámite)



Artículo Científico

Huracán Wilma (2005): Análisis del impacto oceanográfico

Hurricane Wilma (2005): Analysis of the Oceanographic Impact



1. Luz de Lourdes Aurora Coronado Álvarez



0000-0001-5572-3247

Instituto de Investigaciones Oceanológicas,
Universidad Autónoma de Baja California,
Transpeninsular Tijuana-Ensenada, No. 3917,
Fraccionamiento Playitas, 22860 Ensenada,
Baja California, México.



2. Gabriela Y. Cervantes Díaz



0000-0003-3910-6876

Instituto de Investigaciones Oceanológicas,
Universidad Autónoma de Baja California,
Transpeninsular Tijuana-Ensenada, No. 3917,
Fraccionamiento Playitas, 22860 Ensenada,
Baja California, México.

Autor de correspondencia: cervantes.gabriela@uabc.edu.mx

latindex



CREATIVE COMMONS



OPEN ACCESS

Este es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos de la Licencia Creative Commons Atribución-No Comercial-Compartir igual (CC BY-NC-SA 4.0), que permite compartir y adaptar siempre que se cite adecuadamente la obra, no se utilice con fines comerciales y se comparta bajo las mismas condiciones que el origina



Huracán Wilma (2005): Análisis del impacto oceanográfico

Hurricane Wilma (2005): Analysis of the Oceanographic Impact

▶ RESUMEN

El huracán Wilma tuvo un impacto en el sistema oceanográfico del Caribe mexicano que provocó cambios en la temperatura superficial del mar (TSM), la salinidad superficial del mar (SSM) y la clorofila-a (Chl-a). Para evaluar dichos cambios se usaron datos satelitales y análisis bayesiano en el periodo estacionario del huracán 21 - 23 de octubre de 2005, cuando se registraron vientos de alta intensidad $\sim 240 \text{ km h}^{-1}$. Se observó descenso en la TSM y la SSM producto de la mezcla vertical en combinación con las lluvias torrenciales ($\sim 1575 \text{ mm}$). La Chl-a, como proxy de la biomasa fitoplanctónica, presentó un incremento con desfase de 1 a 2 días respecto al paso del huracán debido al enriquecimiento de nutrientes. El análisis bayesiano permitió asociar probabilísticamente los cambios observados en TSM, SSM y Chl-a en el periodo de impacto de Wilma en la porción noreste del estado de Quintana Roo. Estos hallazgos subrayan la sensibilidad a los cambios del sistema oceánico del Caribe mexicano ante huracanes. Este estudio ofrece un marco robusto para comprender la respuesta oceanográfica a estos eventos y herramientas para analizar sus impactos ante fenómenos meteorológicos.

Palabras clave: Anomalía, viento, procesos oceanográficos, sistema ciclónico, Quintana Roo.



► ABSTRACT

Hurricane Wilma had an impact on the oceanographic system of the Mexican Caribbean, causing changes in sea surface temperature (SST), sea surface salinity (SSS), and chlorophyll-a (Chl-a). Satellite data and Bayesian analysis were used to evaluate these changes during the stationary period of the hurricane (October 21 - 23, 2005), when high winds ~ 240 km h⁻¹ were recorded. A decrease in SST and SSS was observed due to vertical mixing in combination with torrential rainfall (~ 1575 mm). Chl-a, as a proxy of phytoplanktonic biomass, showed an increase with a lag of 1 to 2 days concerning the passage of the hurricane due to nutrient enrichment. Bayesian analysis allowed us to probabilistically associate the observed changes in SST, SSM, and Chl-a during Wilma's impact in the northeastern portion of Quintana Roo state. These findings highlight the sensitivity of the Mexican Caribbean Ocean system to hurricane changes. This study provides a robust framework for understanding oceanographic responses to such events and offers tools to analyze their impacts under extreme meteorological phenomena.

Keywords: anomaly, wind, oceanography processes, cyclonic systems, Quintana Roo.

► INTRODUCCIÓN

Los huracanes son eventos climáticos extremos que generan cambios drásticos y rápidos en los sistemas oceánicos que afectan las condiciones físicas del agua en conjunto con la dinámica costera. Estos fenómenos ocasionan variaciones significativas en la temperatura superficial del mar (TSM), la salinidad superficial del mar (SSM) y la actividad biológica. Dentro de las variables proxy que son factibles para su uso está la clorofila satelital (Chl-a) entre otras. Los huracanes tienen la capacidad de alterar la estratificación de la columna de agua al mezclar capas más profundas con aguas superficiales, lo que impacta de forma inmediata los ecosistemas marinos y deja un efecto residual durante días en los cambios termohalinos, químicos y biológicos. En los últimos años



se ha generado un creciente interés por estudiar el impacto del cambio climático en la intensidad y frecuencia de los huracanes en la cuenca del Atlántico. Aunque algunos estudios, como el de Sánchez-Rivera, Frausto-Martínez, Gómez-Mendoza, Terán-Cuevas, Morales-Hernández (2021), no encontraron una tendencia significativa en el número de ciclones en esta región, si identificaron un ligero aumento en la intensidad de huracanes de categorías 4 y 5 en las últimas dos décadas. Esto coincide con las proyecciones de otros trabajos que sugieren que el cambio climático podría estar intensificando los huracanes más extremos (Knutson, Camargo, Chan, Emanuel, Ho, Kossin, Wu, 2019). Estas observaciones resaltan la importancia de realizar análisis detallados que permitan comprender mejor los impactos de estos eventos extremos en regiones vulnerables como el Caribe mexicano (Knutson et al., 2019).

El huracán Wilma, impactó la península de Yucatán en octubre de 2005, éste se caracterizó como uno de los eventos más intensos y duraderos registrados en el Atlántico. Con vientos máximos sostenidos que alcanzaron los 295 km h^{-1} y su permanencia prolongada sobre el Caribe mexicano durante más de ~ 50 horas. El huracán, alcanzó la categoría 5 en la escala Saffir-Simpson, convirtiéndose en un caso emblemático para estudiar los impactos de huracanes extremos en zonas costeras vulnerables (Beven, Brown, Franklin, Knabb, Pasch, Stewart, 2008). Las respuestas oceanográficas observadas tras este evento, como el enfriamiento significativo de la superficie del mar y la redistribución de propiedades físico-químicas, subrayan su capacidad de modificar la dinámica oceánica y los ecosistemas marinos asociados.

Comprender los mecanismos mediante los cuales los huracanes alteran la estructura termohalina y las dinámicas oceanográficas es fundamental, esto para prever sus consecuencias ecológicas y socioeconómicas. Uno de los efectos más notables de Wilma fue el enfriamiento de la capa superficial, resultado de la mezcla vertical inducida por los fuertes vientos y la intrusión de aguas subsuperficiales más frías hacia la superficie. Este proceso, documentado ampliamente en estudios previos, afectó la estabilidad térmica de la columna de agua y, a su vez, facilitó el transporte de nutrientes desde capas más



profundas hacia la superficie, resultando en un estímulo de la productividad primaria de manera temporal en la región (Emanuel, 2005; Sriviver y Huber, 2007).

Adicionalmente, los huracanes pueden modificar la SSM debido a las intensas precipitaciones asociadas. Estas precipitaciones disminuyen temporalmente la salinidad en las capas superiores, mientras que la mezcla vertical redistribuye agua más salina de capas más profundas hacia la superficie. En el Caribe mexicano, estas interacciones físicas tienen un impacto directo en la estabilidad de la columna de agua, influenciando procesos como la estratificación termohalina, los cuales son fundamentales para la dinámica oceánica posterior al paso del huracán. Tales perturbaciones son importantes para comprender los mecanismos que gobiernan la recuperación de los sistemas oceánicos después de eventos extremos (Emanuel, 2005).

Los impactos de Wilma también se extendieron más allá del océano. Las comunidades costeras de Quintana Roo experimentaron efectos devastadores, lo cuales incluyeron daños en infraestructura, pérdida de servicios básicos y alteraciones en las actividades socioeconómicas dependientes del turismo y la pesca. Estos eventos resaltan la necesidad de integrar el análisis de la resiliencia comunitaria en los estudios de impacto de huracanes, para diseñar estrategias que permitan una recuperación más eficiente y sostenible (Lin, Emanuel, Oppenheimer, Vanmarcke, 2020).

Este trabajo se centra en analizar las respuestas oceanográficas provocadas por el huracán Wilma en la porción noreste del estado de Quintana Roo en el periodo del 21 al 23 de octubre de 2005. Se hizo énfasis en las alteraciones en variables clave como la TSM, SSM y Chl-a, cuyos datos fueron de sensores remotos. Asimismo, se realizó el cálculo de las anomalías en estas variables en comparación con los patrones climatológicos promedio de la región.

► MATERIALES Y MÉTODOS

Datos satelitales

Se compilaron datos satelitales para el área de estudio ubicada en la porción noreste del estado de Quintana Roo (Figura 1). En esta región, el huracán Wilma permaneció aproximadamente 51 horas en el Caribe mexicano, el cual cubrió un área geográfica extensa debido a su gran diámetro. Según Pasch, Blake, Cobb III, and Roberts (2005), durante su fase de fortalecimiento, el ojo del huracán se contrajo a un diámetro de solo dos millas náuticas (n mi), lo que lo convirtió en el ojo más pequeño registrado por el personal del Centro Nacional de Huracanes (NHC). Posteriormente, cuando la intensidad del huracán disminuyó, el ojo se extendió a aproximadamente 40 millas náuticas el 20 de octubre. En el resto de su trayectoria, el diámetro del ojo se mantuvo considerablemente grande, fluctuando entre 40 y 60 millas náuticas. En resumen, el diámetro del ojo de Wilma varió de mínimo histórico de dos millas náuticas en su máxima intensidad hasta un rango de 40 a 60 millas náuticas en las fases posteriores del huracán.

Los datos satelitales incluyeron información termohalina del producto L4 de Copernicus Marine Environment Monitoring Service (2024; https://data.marine.copernicus.eu/product/SEALEVEL_GLO_PHY_L4_MY_008_047/description), los cuales consideraron los periodo de enero de 2003 a diciembre de 2007. Las incertidumbres asociadas a las mediciones fueron de ~ 0.03 °C para la temperatura superficial del mar (TSM) y ~ 0.2 para la salinidad superficial del mar (SSM; Olmedo, Martínez, Turiel, Ballabrera-Poy, Portabella, 2017; Meissner y Wentz, 2018). Asimismo, se utilizaron datos de clorofila-a (Chl-a) obtenidos de la plataforma MODIS-Aqua, con imágenes diarias y una resolución espacial de 4x4 km, proporcionados por la National Aeronautics and Space Administration (2021), correspondientes al mismo periodo de enero 2003 a diciembre 2007. Finalmente, se extrajeron datos diarios del viento con intervalos de una hora, correspondientes al mes de octubre de 2005, utilizando el producto de reanálisis ERA5 (Copernicus Climate Change Service; C3S, 2017). El análisis de viento se centró



exclusivamente en octubre de 2005 para evaluar las condiciones previas, durante y posteriores al huracán Wilma, ya que su impacto es particularmente evidente en este periodo.

Procesamiento

A continuación, se detalla el procesamiento de los datos oceanográficos satelitales realizados para cumplir con los objetivos de este estudio.

El periodo de estudio abarcó desde el 15 hasta el 25 de octubre de 2005, el cual cubre desde la formación del huracán Wilma hasta su ingreso al Golfo de México, con una trayectoria hacia Florida (NOAA, 2005). El área de estudio correspondiente a este periodo se ubicó entre los 15° y 23° de latitud norte y entre -86° y -87.5° de longitud oeste (Figura 1).

Los datos de TSM, SSM y Chl-a fueron procesados con el software MATLAB (MathWorks, 2024). Se generaron gráficos de cada variable (TSM, SSM y Chl) en función de la latitud y el tiempo, con el objetivo de resaltar las anomalías y variaciones a lo largo del área de estudio. Estos gráficos fueron diseñados para identificar los patrones espaciales y temporales de cada variable durante el paso del huracán.

Además, para identificar las variaciones atípicas en las variables estudiadas, se calcularon las anomalías de TSM, SSM y Chl-a en comparación con los promedios mensuales climatológicos. Los valores de anomalías iguales a 0 representan el promedio climatológico mensual, mientras que los valores positivos reflejan desviaciones por encima de este promedio y los valores negativos indican desviaciones por debajo. Este enfoque permitió evaluar con mayor detalle el impacto del huracán sobre las condiciones oceánicas.

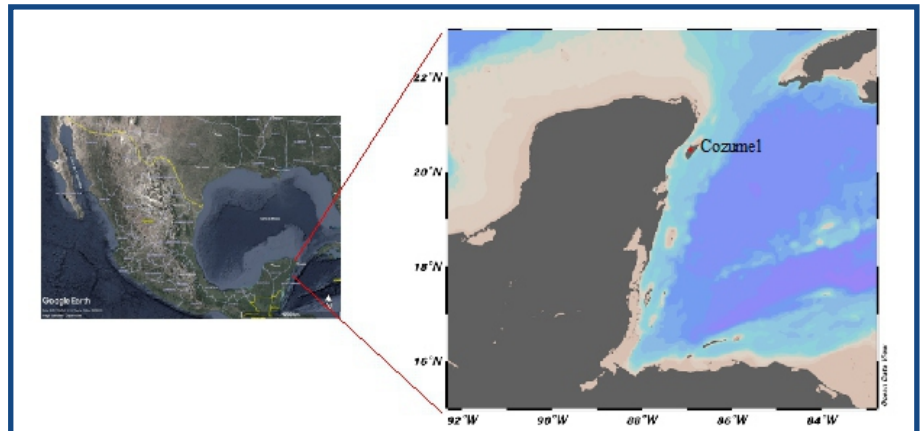


Figura 1. Porción noreste del estado de Quintana Roo (21.2° N y 86.9° W), área de mayor influencia del huracán Wilma.

Análisis estadístico bayesiano

Se aplicó un enfoque bayesiano basado en simulaciones de Monte Carlo mediante Cadenas de Markov (MCMC) para evaluar la probabilidad de cambios significativos en las variables estudiadas, al comparar las anomalías previas, durante y posteriores al paso de Wilma. Este análisis se realizó en MATLAB (MathWorks, 2024), generando distribuciones posteriores e intervalos de credibilidad para evaluar la robustez de los cambios observados. A diferencia de los métodos tradicionales basados en valores de p o coeficientes de correlación (r), este enfoque permite interpretar directamente las probabilidades de los escenarios analizados, incorporando y cuantificando las incertidumbres asociadas. El modelo bayesiano proporcionó un contexto probabilístico para las anomalías, ofreciendo una visión más detallada y matizada del impacto de Wilma en el sistema oceánico.

▶ RESULTADOS

La estacionalidad del área de estudio se clasifica en tres periodos: lluvias, secas y nortes (Márdero, Nickil, Schmook, Scheneider, Rogan, Christman, Lawrence, 2012). Durante la temporada de lluvias, fenómenos meteorológicos como depresiones, tormentas tropicales y huracanes afectan la región. Por su parte, la época de nortes se caracteriza por la presencia de vientos provenientes del noreste (NE), los cuales provocan un descenso en la temperatura y alcanzan velocidad que oscilan entre 4.5 - 10 $m s^{-1}$ (Rychlik, Wengang Mao, 2019).

Para evaluar el efecto de los vientos durante el huracán, se analizó el producto ERA5 exclusivamente para el mes de octubre del 2005. Los resultados mostraron que las velocidades más altas se registraron entre el 21 y el 25 de octubre, donde alcanzaron valores cercanos a los 20 m s^{-1} ($\sim 60 \text{ k h}^{-1}$; Figura 2). Estos vientos provocaron una intensa mezcla en la columna de agua, lo que tuvo implicaciones en las variables termohalinas y de Chl-a, como se detallan más adelante. La dirección del viento exhibió un patrón cíclico asociado al movimiento del ojo del huracán, consistente con las trayectorias típicas de los huracanes, caracterizadas por vientos que rotan en sentido antihorario debido a la fuerza de Coriolis.

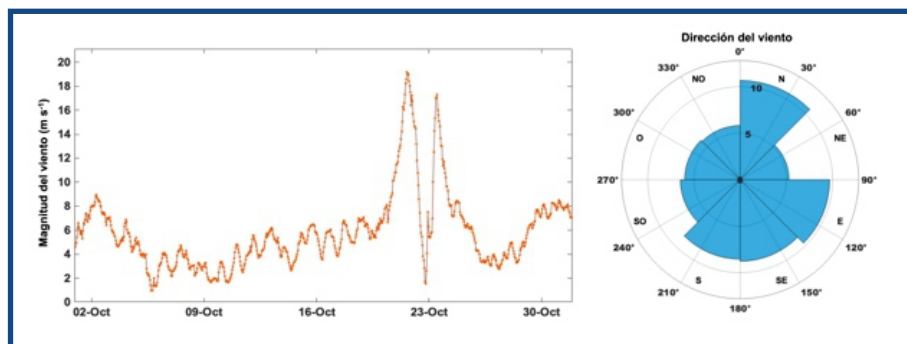


Figura 2. Magnitud (m s^{-1}) y dirección del viento para el periodo de octubre 2005. Los datos fueron obtenidos del producto de reanálisis ERA5 (Copernicus Climate Change Service, 2017), con una resolución diaria por hora a un cuarto de grado.

El análisis realizado de las variables de TSM, SSM, y Chl-a durante el periodo 2003 - 2007 permitió identificar tanto patrones estacionales (Figura 3) como las anomalías asociadas a estas variables en diferentes estaciones del año (Figura 4). La TSM y SSM presentaron oscilaciones con periodos de valores más bajos durante la temporada de nortes; mientras que los incrementos en estas variables estuvieron asociados a un aumento en la temperatura ambiental, lo que marca el inicio del verano, cuando alcanza su punto máximo. En contraste, a inicios de año, durante las temporadas de nortes y secas, se observaron los valores más bajos, con anomalías de -0.5° a -1° C para TSM y de 0 a -0.1 ups para la SSM. Lo que corresponde a fluctuaciones naturales del área bajo diferentes escenarios estacionales.

Los cambios observados en la Chl-a reflejaron las variaciones termohalinas; ya que, durante los meses de enero a abril, cuando la columna de agua experimenta una mayor mezcla debido a los nortes, los valores de Chl-a que se registraron fueron más altos ($0.2 - 0.4 \text{ mg m}^{-3}$) en comparación a los valores obtenidos para la segunda mitad del año ($<0.2 \text{ mg m}^{-3}$; Figura 3). Las anomalías positivas de Chl-a durante la época de nortes se ubicaron en el rango $0 - 0.04 \text{ mg m}^{-3}$; mientras que, las anomalías negativas de 0 a 0.06 mg m^{-3} indicaron un déficit de Chl-a, aunado con una columna de agua que se mantiene estratificada.

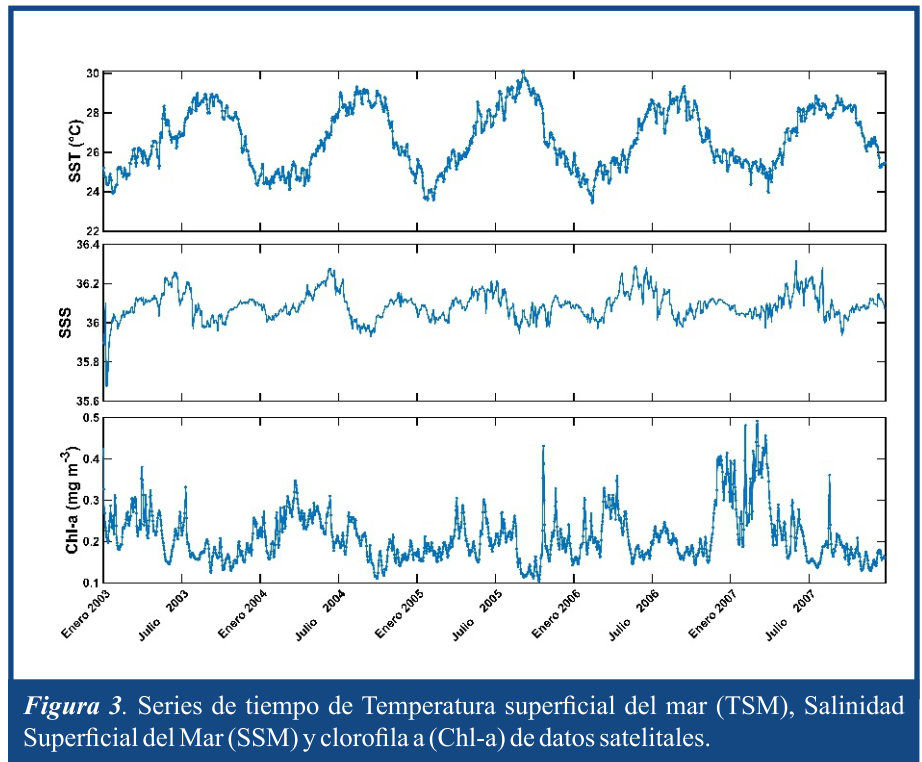


Figura 3. Series de tiempo de Temperatura superficial del mar (TSM), Salinidad Superficial del Mar (SSM) y clorofila a (Chl-a) de datos satelitales.

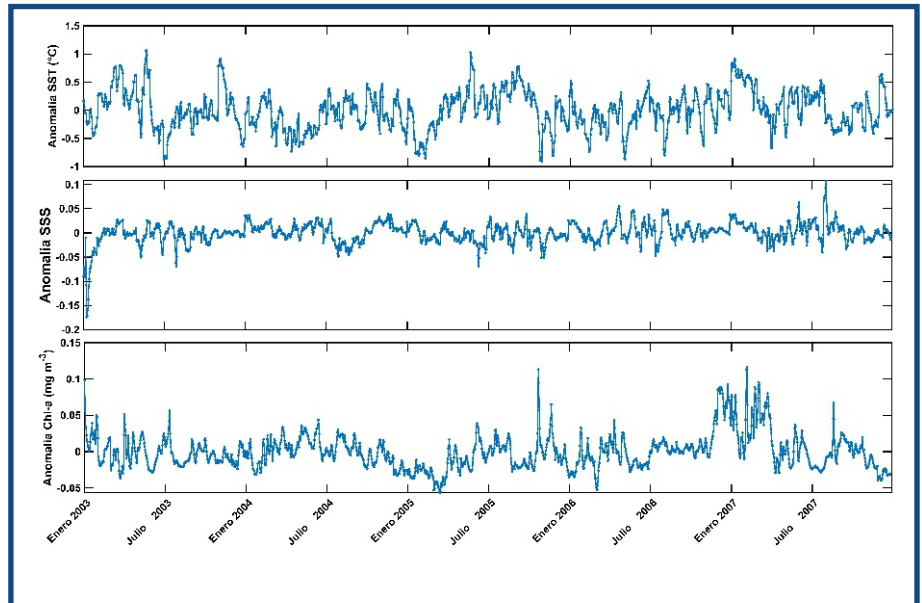


Figura 4. Anomalías de las series de tiempo de Temperatura superficial del mar (TSM), Salinidad Superficial del Mar (SSM) y clorofila a (Chl a) a partir de datos satelitales, las cuales fueron calculadas como diferencia entre los valores climatológicos y el valor promedio mensual.

En el mismo sentido, se realizó el análisis de TSM, SSM y Chl-a dentro de una ventana de tiempo específica (octubre 2005), con el objetivo de observar a detalle los cambios en estas variables antes, durante y después del huracán Wilma (Figura 5). Como se citó anteriormente, la TSM descendió de 0.2° a 1° C del 21 al 25 de octubre del 2005, respectivamente. En tanto que para estas fechas la SSM mantuvo valores cercanos al promedio al inicio de este periodo con ligera disminución posterior. Estas diferencias se debieron a un efecto combinado y enmascarado; es decir, la mezcla intensa indujo el afloramiento de agua con contenido mayor de salinidad a superficie. Efecto contrario fue el que se observó en los valores de Chl-a, ya que estos fueron más altos a posteriori al huracán, decayendo nuevamente a finales del mes.

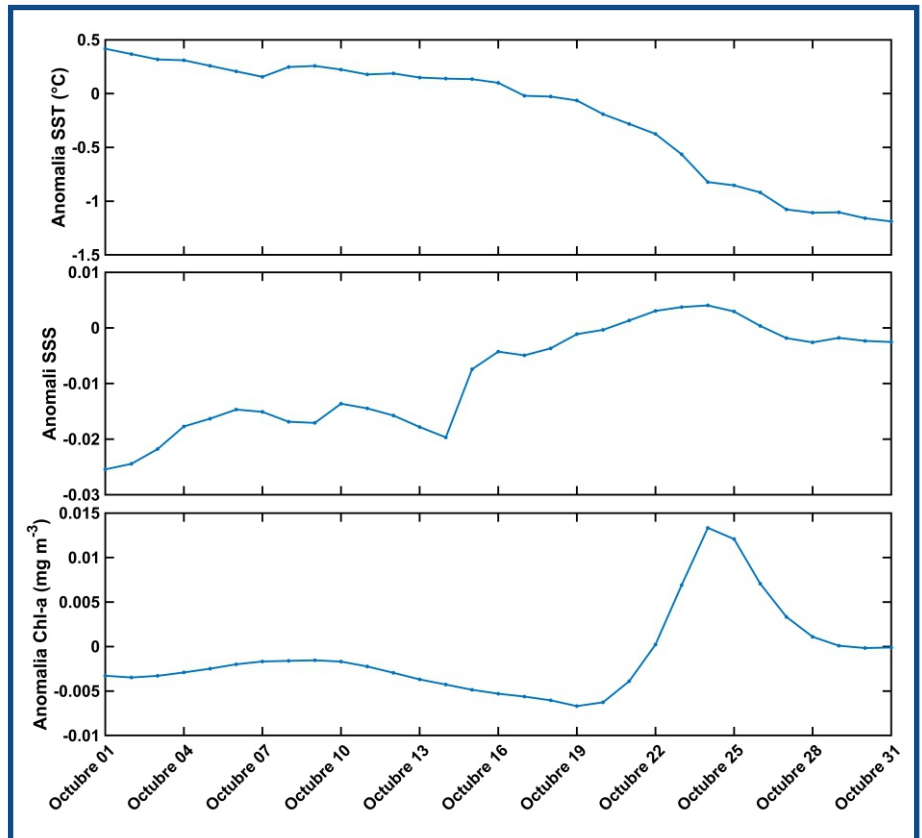


Figura 5. Anomalías de las variables de Temperatura superficial del mar (TSM), Salinidad Superficial del Mar (SSM) y clorofila a (Chl a) de datos satelitales para el mes de octubre de 2005.

Finalmente, los resultados de los análisis estadísticos indicaron la probabilidad de la diferencia entre los valores climatológicos y las condiciones durante el periodo en el que se presentó el huracán. En el caso de la TSM se reportó un 45% de probabilidad de que el valor observado durante el huracán Wilma sea mayor que el valor climatológico para TSM. Esto sugiere que hay una ligera tendencia hacia un aumento de SST durante el inicio del evento de Wilma en comparación con la climatología. Sin embargo, se detectó una tendencia hacia la disminución de esta variable durante el huracán (21 - 23 de octubre).

En tanto, la probabilidad de que SSM sea mayor que la climatología es ~67 %, lo que indica una distribución más equilibrada entre valores mayores y menores para la salinidad en ambos escenarios, tanto previo como durante el huracán. Con respecto a la Chl-a se estimó que existe un 68% de probabilidad de que la concentración de este pigmento sea mayor con respecto al valor climatológico durante y posterior al Wilma.

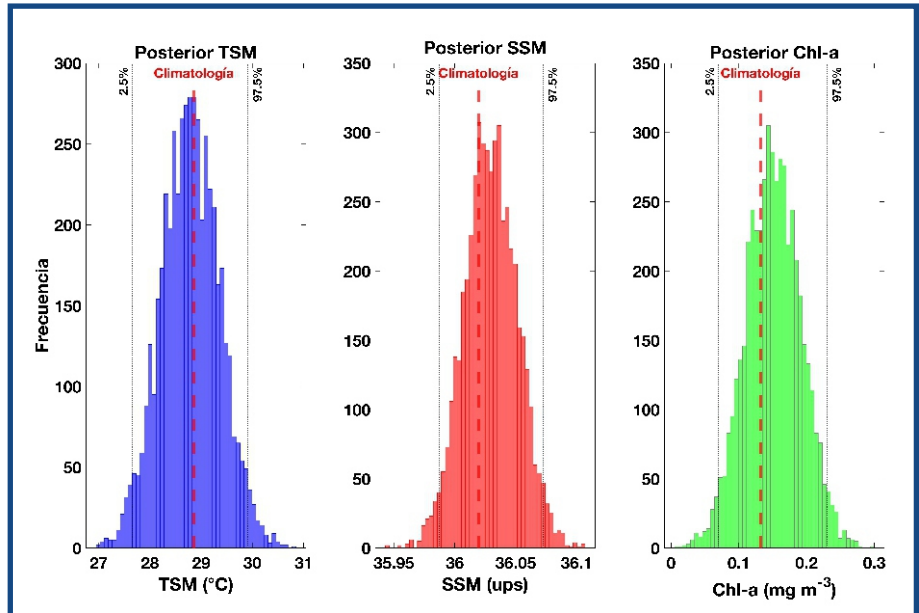


Figura 6. Frecuencias de las distribuciones a posteriori de la Temperatura Superficial del Mar (azul; TSM), Salinidad Superficial del Mar (rojo; SSM) y clorofila a (verde; Chl-a) calculados con modelo bayesiano mediante el uso de Monte Carlo Cadenas de Markov, a partir de datos satelitales de estas variables. La línea roja discontinua representa el promedio climatológico; las líneas negras discontinuas representan los intervalos de credibilidad al 95%.

DISCUSIÓN

Los resultados de este estudio muestran que el huracán Wilma tuvo un impacto significativo en la región de estudio, el cual generó cambios sustanciales en las variables de TSM, SSM y Chl-a. Estos cambios reflejan modificaciones en las condiciones oceánicas, lo que promovió procesos de mezcla vertical y redistribución de propiedades termohalinas, químicas y biológicas. Las anomalías observadas en estas tres variables fueron impulsadas por las altas velocidades de los vientos registrados, con rachas de hasta 240 km h⁻¹ (Martell-Dubois, Silva-



Casarin, Muñoz-Pérez, Cerdeira-Estrada, Escalante-Mancera, Liaz, 2018). La intensidad y persistencia de los vientos durante el periodo estacionario del huracán (21-23 de octubre) fueron factores determinantes en la mezcla vertical y el afloramiento de aguas de mayor profundidad hacia la superficie, lo que alteró la dinámica oceánica de la región.

Es importante destacar que los patrones de viento asociados al huracán generaron un enfriamiento adicional al aumentar la transferencia de calor desde la superficie del océano hacia la atmósfera, amplificando el efecto de la mezcla vertical. Este proceso promovió una redistribución de las propiedades termohalinas y químicas (por ejemplo, presión parcial de CO₂ y pH), lo que modificó los gradientes de densidad y facilitó una mayor mezcla vertical en la columna de agua. Estudios han demostrado que los nortes (vientos intensos) en el Golfo de México pueden causar una mezcla vertical extremadamente intensa, lo que favorecerá un transporte de nutrientes y carbono, aunque con un pH reducido, hacia la capa eufótica (Damien, Sheinbaum, Pasquero de Fommervault, Jouanno, Linacre, Dutiel, 2021; Cervantes-Díaz, Hernández-Ayón, Zirino, Herzka, Camacho-Ibar, Norzagaray, Barbero, Montes, Sudre, Delgado, 2022).

El análisis bayesiano reveló una alta probabilidad a posteriori de que la SSM permaneciera cercana a la media climatológica. Este resultado puede atribuirse al equilibrio entre dos factores: por un lado, el efecto de la mezcla vertical, que tiende a incrementar la salinidad al incorporar agua más salina de las capas subsuperficiales, y por otro, el aporte de agua dulce derivado de las intensas lluvias asociadas al huracán. Asimismo, aunque la precipitación podría haber reducido aún más la salinidad, este efecto fue contrareestado por el transporte de agua subsuperficial más salina, generado por la intensa mezcla vertical causada por los fuertes vientos ($\sim 20 \text{ m s}^{-1}$).

Estos cambios en salinidad y temperatura redujeron la estabilidad de la columna de agua, favoreciendo el afloramiento de nutrientes desde capas más profundas hacia la superficie. Este fenómeno se reflejó en un incremento en la biomasa fitoplanctónica, evidenciado por los valores más altos de Chl-a ($\sim 0.45 \text{ mg m}^{-3}$; Figura 2). Las anomalías de Chl-a



($\sim 0.02 \text{ mg m}^{-3}$; Figura 4) confirmaron un aumento en la actividad fitoplanctónica, con un desfase de 1 a 2 días respecto al paso del huracán. Este retraso es consistente con el tiempo necesario para que los organismos fitoplanctónicos respondan al enriquecimiento de nutrientes. Aunque no se disponía de datos directos sobre nutrientes en la columna de agua, el análisis de imágenes satelitales de Chl-a proporcionó un proxy confiable para evaluar la biomasa fitoplanctónica durante el evento.

Cabe señalar que el análisis bayesiano empleado en este estudio permitió cuantificar los cambios observados y asociarlos de manera probabilística con los efectos directos del huracán Wilma. Este enfoque aportó un marco riguroso para evaluar la significancia de las anomalías, lo cual resulta particularmente valioso en eventos extremos, donde la heterogeneidad espacial y temporal puede complicar el análisis de los impactos.

Uno de los principales hallazgos de este estudio fue la identificación de un enfriamiento durante el paso de Wilma, un fenómeno que ha sido observado en otros estudios de huracanes en diferentes regiones. Estos resultados son de gran relevancia, ya que destacan la sensibilidad del sistema oceánico de la región a huracanes intensos y a sus efectos en la redistribución de nutrientes, lo que puede alterar la estructura de las comunidades marinas y modificar la dinámica de las redes tróficas.

Este estudio contribuye a la comprensión del impacto de huracanes en el sistema oceanográfico del Caribe mexicano, donde Wilma se consideró uno de los tres huracanes de categoría 5 registrados más destructivos en las últimas décadas que impactaron las costas de Quintana Roo. Estas evidencias se tornan relevantes en un contexto del cambio climático, donde se espera un aumento en la frecuencia e intensidad de estos fenómenos. Las metodologías empleadas, que incluyen el análisis de datos satelitales y modelos bayesianos, proporcionan un marco robusto que puede aplicarse en el estudio de otros eventos extremos. Además, esta investigación no solo profundiza en la respuesta oceanográfica ante huracanes, sino también proporciona herramientas valiosas para optimizar el análisis de sus impactos.



Finalmente, el impacto de Wilma subrayó la importancia de considerar los factores ambientales y los riesgos de desastres naturales tanto para el ecosistema como para la sociedad (Nicholls, Hoozemans, Marchand, 1999). El huracán resaltó la importancia de conservar los ecosistemas costeros naturales, como los arrecifes de coral y los manglares, que funcionan como barreras naturales contra tormentas y ayudan a proteger las comunidades costeras (Alongi, 2008).

En resumen, el huracán Wilma generó alteraciones significativas en las condiciones oceanográficas del Caribe mexicano, afectando las variables de TSM, SSM y Chl-a. La mezcla vertical inducida por los fuertes vientos del huracán promovió el afloramiento de aguas más frías y salinas, lo que, a su vez, contrarrestó el efecto de las lluvias torrenciales que aportaron agua de baja salinidad. Este fenómeno también impulsó un incremento en la biomasa fitoplactónica, reflejado en el aumento de la Chl-a. Dado el contexto de cambio climático, que prevé un aumento en la intensidad de huracanes, este estudio ofrece un enfoque metodológico sólido, combinando datos satelitales y modelos bayesianos, que puede ser clave para fortalecer la gestión y conservación de estos ecosistemas, así como para el desarrollo de estrategias de adaptación y mitigación ante futuros eventos climáticos extremos.

► CONCLUSIONES

El presente estudio evidencia los profundos impactos del huracán Wilma en las condiciones oceanográficas y sociales de la región del Caribe mexicano. A través del análisis de datos satelitales, modelados con un enfoque probabilístico bayesiano, se identificaron cambios significativos en las variables de Temperatura Superficial del Mar (TSM), Salinidad Superficial del Mar (SSM) y clorofila-a (Chl-a), los cuales reflejan las dinámicas de mezcla vertical y redistribución de propiedades termohalinas en respuesta a los fuertes vientos y precipitaciones extremas asociadas al evento. Este enfoque permitió cuantificar, con un marco robusto, las probabilidades de las anomalías



observadas, y proporciona una perspectiva detallada de los procesos físicos y biológicos involucrados.

Los resultados indican que el huracán generó un enfriamiento de la columna de agua, acompañado por un incremento temporal en la biomasa fitoplanctónica, evidenciado por el aumento en los valores de Chl-a. Estos fenómenos se relacionaron con el afloramiento de aguas subsuperficiales ricas en nutrientes, lo que favoreció temporalmente la productividad primaria en la región. Sin embargo, la interacción entre la precipitación torrencial y la mezcla vertical mostró un balance complejo que mitigó los cambios extremos en la salinidad superficial.

El estudio reconoce como una limitante la ausencia de mediciones directas de variables como nutrientes, pH, entre otras, en la columna de agua, lo que podría reforzar la interpretación de los procesos biogeoquímicos. Además, se subraya que los hallazgos están circunscritos al contexto regional y temporal analizado, por lo que futuros estudios deberían considerar análisis más amplios que incluyan otros sistemas costeros y una resolución temporal extendida.

En un contexto de cambio climático, donde se prevé un aumento en la frecuencia e intensidad de huracanes, los hallazgos de este estudio ofrecen herramientas valiosas para el monitoreo y análisis de eventos extremos. El enfoque combinado de imágenes satelitales y modelado bayesiano proporciona un marco metodológico replicable, que resulta clave para fortalecer estrategias de gestión ambiental, conservación de ecosistemas costeros y mitigación de impactos climáticos. Este trabajo enfatiza la importancia de integrar esfuerzos interdisciplinarios para comprender mejor la interacción entre fenómenos extremos y sistemas oceánicos, promoviendo la resiliencia de las comunidades y ecosistemas costeros ante desafíos climáticos futuros.



► LITERATURA CITADA

Alongi, D. M. (2008). Mangrove forests: Resilience, protection, and management. *Marine Pollution Bulletin*, 56(3), 806-815. [10.1016/j.ecss.2007.08.024](https://doi.org/10.1016/j.ecss.2007.08.024) [https://](https://doi.org/10.1016/j.ecss.2007.08.024)

Beven, J. L., Brown, D. P., Franklin, J. L., Knabb, R. D., Pasch, R. J., & Stewart, S. R. (2008). Atlantic Hurricane Season of 2005. *Monthly Weather Review*, 136(3), 1109–1173. <https://doi.org/10.1175/2007MWR2074.1>

Cervantes-Díaz, G. Y., Hernández-Ayón, J. M., Zirino, A., Herzka, S. Z., Camacho-Ibar, V., Norzagaray, O., Barbero, L., Montes, I., Sudre, J., Delgado, J. A. (2022). Understanding upper water mass dynamics in the Gulf of Mexico by linking physical and biogeochemical features. *Journal of Marine Systems*, 225, 103647. doi.org/10.1016/j.jmarsys.2021.103647

Copernicus Climate Change Service (C3S). (2017). ERA5: Fifth generation of ECMWF atmospheric reanalyses of the global climate. Copernicus Climate Change Service Climate Data Store (CDS), *Noviembre 2024*. <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/home>

Copernicus Marine Environment Monitoring Service, CMEMS. (2014). Global Ocean Gridded L 4 Sea Surface Heights and Derived Variables Reprocessed 1993 Ongoing. Level 4. doi.[10.48670/moi-00148](https://doi.org/10.48670/moi-00148)

Damien, P., Sheinbaum, J., Pasqueron de Fommervault, O., Jouanno, J., Linacre, L., and Duteil, O. (2021). Do Loop Current eddies stimulate productivity in the Gulf of Mexico? *Biogeochemistry*, 18, 4281-4303. <https://doi.org/10.5194/bg-18-4281-2021>.

Emanuel, K. (2005). Increasing destructiveness of tropical cyclones over the past 30 years. *Nature*, 436(7051), 686–688. <https://doi.org/10.1038/nature03906>

Knutson, T. R., Camargo, S. J., Chan, J. C., Emanuel, K., Ho, C.-H., Kossin, J., & Wu, L. (2019). Tropical cyclones and climate change assessment: Part I. Detection and attribution. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 100(10), 1987–2007. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-18-0189.1>



Lin, N., Emanuel, K. A., Oppenheimer, M., & Vanmarcke, E. (2020). Physically based assessment of hurricane surge threat under climate change. *Nature Climate Change*, 2(6), 462–467. <https://doi.org/10.1038/nclimate1389>

Márdero, S., Nickl, E., Schmook, B., Schneider, L., Rogan, J., Christman, Z., Lawrence, D. (2012). Sequías en el sur de la península de Yucatán: análisis de la variabilidad anual y estacional de la precipitación. *Inv. Geo.* 78, 19-33. <https://doi.org/10.14350/rig.32466>

Martell-Dubois, R., Silva-Casarin, R., Mendoza-Baldwin, E. G., Muñoz-Pérez, J. J., Cerdeira-Estrada, S., Escalante-Mancera, E., & Laiz, I. (2018). Spectral bimodality of waves produced by hurricanes in the Caribbean coastal zone off Mexico. *Ciencias Marinas*, 44(1), 33–48. <https://doi.org/10.7773/cm.v44i1.2717>

Nicholls, R. J., Hoozemans, F. M. J., & Marchand, M. (1999). Increasing flood risk and wetland losses due to global sea-level rise: Regional and global analyses. *Global Environmental Change*, 9(1), S69-S87. [https://doi.org/10.1016/S0959-3780\(99\)00019-9](https://doi.org/10.1016/S0959-3780(99)00019-9)

National Aeronautics and Space Administration, NASA. (2021). Goddard Space Flight Center, Ocean Ecology Laboratory, Ocean Biology Processing Group. Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) Aqua (Daily Chlorophyll 4 Km Data.) NASA Ob. DAAC, Greenbelt, MD, USA (2021), [10.5067/AQUA/MODIS/LM3/CHL/2018](https://doi.org/10.5067/AQUA/MODIS/LM3/CHL/2018) Accessed on 30/08/2024

Olmedo, E., Martínez, J., Turiel, A., Ballabrera-Poy, J. and Portabella, M. (2017). Debaised non-Bayesian retrieval: A novel approach to SMOS Sea Surface Salinity. *Rem. Sens. Env.* 193, 103-126. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.02.023>

Pasch, R.J., Blake, E.S., Cobb III, H. D., & Roberts, D.P. (2005). Tropical Cyclone Report Hurricane Wilma 15-25 October 2005. National Hurricane Center. https://www.nhc.noaa.gov/data/tcr/AL252005_Wilma.pdf



Sánchez-Rivera, G., Frausto-Martínez, O., Gómez-Morales, L., Terán-Cuevas, A., & Morales-Hernández, J. (2021). Tropical Cyclones in the North Atlantic Basin and Yucatan Peninsula, Mexico: Identification of Extreme Events. *IJDNE*, 16 (2) 145-160, <https://doi.org/10.18280/ijdne.160204>

Sriver, R. L., & Huber, M. (2007). Observational evidence for an ocean heat pump induced by tropical cyclones. *Nature*, 447(7144), 577–580. <https://doi.org/10.1038/nature05785>