Efecto de los Huracanes Wilma (2005), Matthew (2016) y María (2017) en la capa superior del Mar Caribe

Carlos Daniel Rodríguez Sandoval

Universidad del Norte

División de Ciencias Básicas, Departamento de Física y Geociencias

Barranquilla, Colombia

2024

Efecto de los Huracanes Wilma (2005), Matthew (2016) y María (2017) en la capa superior del Mar Caribe

Carlos Daniel Rodríguez Sandoval

Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de:

Geólogo

Director:

Ph.D. Rafael Ricardo Torres Parra

Ph.D. Juan Carlos Ortiz Royero

Línea de Investigación:

Interacción Océano – Atmósfera

Universidad del Norte

División de Ciencias Básicas, Departamento de Física y Geociencias

Barranquilla, Colombia

2024

I think it all comes down to motivation. If you really want to do something, you will work hard for it.

Edmund Hillary

Agradecimientos

Mención especial a mis padres, Carlos Julio Rodríguez y Yeimy María Sandoval, gracias por su apoyo incondicional, amor y respaldo en cada paso de mi vida. Han sido mi fuerza e inspiración para alcanzar mis objetivos.

Agradezco a mis abuelos María Velandia y Edinson Sandoval, a mis tías Luz Ángela Sandoval y Darling Sandoval por el cariño, la confianza y disposición brindada durante estos años.

A mis amigos Sebastián, Jhon, Valery, Yajewa, Daniela, Laura Rodriguez, Elisabeth Bolívar y Juan Quintero. Su amistad y apoyo ha sido importante durante todo este tiempo en la universidad.

A Ingri Herrera González, Juan Medrano, Misael Castro y Wilson Cano por su apoyo, disposición y colaboración durante todo este tiempo. Su ayuda ha sido importante para mis logros.

Infinitas gracias a mis directores, PhD. Rafael Ricardo Torres y PhD. Juan Carlos Ortiz, por su orientación y paciencia durante este proceso. Sus conocimientos y consejos han sido fundamentales en la culminación de este trabajo de grado, además de mejorar mis competencias académicas y contribuir en mi crecimiento personal.

Finalmente, me gustaría dedicar este trabajo en memoria de mis queridos abuelos Luz Marina Ramírez y Carlos Rodriguez, quienes siempre me brindaron su amor.

Resumen

Un ciclón tropical (llamado huracán para el Océano Atlántico y el noreste del Océano Pacifico) provoca, entre otras cosas, cambios en la columna de agua a su paso, induciendo a la formación y progresión de múltiples procesos en los océanos. En este trabajo de investigación, se analizó el comportamiento de la temperatura superficial del mar (TSM) y la profundidad de la capa de mezcla (MLD) al paso de los huracanes de máxima categoría Wilma (2005), Matthew (2016) y María (2017), a partir de datos in-situ obtenidos por las boyas oceanográficas (42056, 42057 y 42058, de la NOAA), una estación meteorológica (CHSV3) y datos de reanálisis del Servicio Marino de Copernicus. Se definieron tres escenarios (antes, durante y después del paso más cercano por alguna de las boyas oceanográficas o estación meteorológica) para analizar su incidencia en el Mar Caribe. Durante su paso, los huracanes Matthew y María provocaron los mayores enfriamientos sobre la capa superficial del océano, con valores in-situ mayores a 3°C, mientras que Wilma se caracterizó por presentar enfriamientos bajos (0.8°C y 1.7°C) durante su incidencia sobre dos boyas diferentes, mostrando una relación directa entre la intensidad del viento y el enfriamiento superficial. Respecto a la profundidad de la capa de mezcla evaluada cerca de las boyas y estación meteorológica, los huracanes Wilma, Matthew y María provocaron variaciones no homogéneas en distintas zonas. Se observaron procesos de asomeramiento durante producto de la succión de Ekman inducida por estos huracanes, y profundización para los días siguientes. María tuvo una respuesta con un asomeramiento de la capa de mezcla de ~2.2 m, a diferencia de Matthew y Wilma con valores de asomeramiento superiores a los 10 m.

Palabras clave: Temperatura superficial del mar, Profundidad de la capa de mezcla, Boya oceanográfica, Estación meteorológica, Succión de Ekman.

Abstract

Tropical cyclones (named hurricanes in the Atlantic Ocean and northeast of the tropical Pacific) cause changes in the water column as they pass through, inducing the formation and progression of multiple processes in the oceans. This research assessed the sea surface temperature (SST) and mixing layer depth (MLD) behavior during the passage of the maximum category hurricanes Wilma (2005), Matthew (2016) and Maria (2017), based on in-situ data obtained from oceanographic buoys (42056, 42057 and 42058), a meteorological station (CHSV3) and reanalysis data from the Copernicus Marine Service. Three scenarios were defined (before, during and after the closest passage to the oceanographic buoys or meteorological station) to assess their impact on the Caribbean Sea. During their passage, hurricanes Matthew and Maria caused the strongest sea Surface cooling, with values greater than 3°C, while Wilma was characterized by weaker cooling (0.8°C and 1.7°C) during its passage close to two different buoys, showing a direct relationship between wind intensity and surface cooling. In terms of MLD assessed close to the buoys and meteorological station, hurricanes Wilma, Matthew and Maria caused heterogeneous variations in different areas. Mixed layer shoaling due to Ekman suction forced by these hurricanes was observed, by also mixed layer deepening in the following days. Maria had a weak response with a mixed layer shoaling of ~2.2 m, whereas Matthew and Wilma shoaling was greater than 10 m.

Keywords: Sea surface temperature, Mixed layer depth, Oceanographic buoy, Meteorological station, Ekman suction.

Tabla de contenido

Resumen ..... **I**

Abstract ..... **II**

Lista de figuras ..... **III**

Lista de tablas ..... **V**

1. Introducción **1**

2. Objetivos **7**

2.1 Objetivo general 7

2.2 Objetivos específicos 7

3. Datos y Metodología **7**

4. Variaciones de la Temperatura Superficial del Mar al paso de huracanes **10**

4.1 Huracán Wilma (2005) 10

4.2 Huracán Matthew (2016) 14

4.3 Huracán María (2017) 16

5. Influencia de los huracanes en la profundidad de la capa de mezcla **18**

5.1 Huracán Wilma (2005) 19

5.2 Huracán Matthew (2016) 23

5.3 Huracán María (2017) 25

6. Análisis de resultados **27**

7. Conclusiones **31**

8. Recomendaciones **32**

9. Bibliografía **33**

Lista de figuras

Figura 1. *(a) Divergencia o surgencia de agua fría profunda sobre la superficie del océano (upwelling), y (b) convergencia o hundimiento de la termoclina (downwelling). Tomado y modificado de Waldman (2018) & Beesley et al (2008).* *3*

Figura 2. *Zona de estudio (Mar Caribe) con isobatas de 1000, 2000 y 3000 metros. Los puntos rojos indican la ubicación de las Boyas y Estaciones Oceanográficas (NOAA). Batimetría de GEBCO.* *4*

Figura 3. *Trayectoria huracanes Wilma (2005), Matthew (2016) y María (2017), junto con sus escenarios según escala de Saffir-Simpson. Datos tomados del International Best Track Archive for Climate Stewardship (IBTrACS).* *6*

Figura 4. *Serie de tiempo de datos in-situ (cada 60 minutos) de temperatura en la capa superficial del mar obtenidos por la boya 42057 (NOAA). La flecha roja (fecha y hora) indica el paso más cercano al centro del huracán Wilma por la boya.* *10*

Figura 5. *(a) Campo de TSM el 19 de octubre del 2005 (1200 UTC), al paso más cercano del huracán Wilma por la boya 42057 (punto verde). Anomalías de TSM en °C con respecto a los valores de (a), para las 48 y 24 horas anteriores (b-c) y posteriores (d-e) al paso más cercano del huracán por la boya. En el título de cada panel se indica la categoría del huracán a las 1200 UTC del día correspondiente. En todas las figuras se muestra la posición del centro del huracán cada 24 horas (1200 UTC), así como los radios de vientos sostenidos de 63 km h^{-1} (circulo más externo), 90 km h^{-1} y 119 km h^{-1}.* *11*

Figura 6. *Serie de tiempo de datos in-situ (cada 60 minutos) de temperatura en la capa superficial del mar obtenidos por la boya 42056 (NOAA). La flecha roja (fecha y hora) indica el paso más cercano al centro del huracán Wilma por la boya.* *12*

Figura 7. *(a) Campo de TSM el 21 de octubre del 2005 (1200 UTC), al paso más cercano del huracán Wilma por la boya 42056 (punto verde). Anomalías de TSM en °C con respecto a los valores de (a), para las 48 y 24 horas anteriores (b-c) y posteriores (d-e) al paso más cercano del huracán por la boya. En el título de cada panel se indica la categoría del huracán a las 1200 UTC del día correspondiente. En todas las figuras se muestra la posición del centro del huracán cada 24 horas (1200 UTC), así como los radios de vientos sostenidos de 63 km h^{-1} (circulo más externo), 90 km h^{-1} y 119 km h^{-1}.* *13*

Figura 8. *Serie de tiempo de datos in-situ (cada 50 minutos) de temperatura en la capa superficial del mar obtenidos por la boya 42058 (NOAA). La flecha roja (fecha y hora) indica el paso más cercano al centro del huracán Matthew por la boya.* *14*

Figura 9. *(a) Campo de TSM el 3 de octubre del 2016 (1200 UTC), al paso más cercano del huracán Matthew por la boya 42058 (punto verde). Anomalías de TSM en °C con respecto a los valores de (a), para las 48 y 24 horas anteriores (b-c) y posteriores (d-e) al paso más cercano del huracán por la boya. En el título de cada panel se indica la categoría del huracán a las 1200 UTC del día correspondiente. En todas las figuras se muestra la posición del centro del huracán cada 24 horas (1200 UTC), así como los radios de vientos sostenidos de 63 km h^{-1} (circulo más externo), 90 km h^{-1} y 119 km h^{-1}.* *15*

Figura 10. *Serie de tiempo de datos in-situ (cada 6 minutos) de temperatura en la capa superficial del mar obtenidos por la estación CHSV3 (NOAA). La flecha roja (fecha y hora) indica el paso más cercano al centro del huracán María por la boya.* .. *16*

Figura 11. *(a) Campo de TSM el 20 de septiembre del 2017 (1200 UTC), al paso más cercano del huracán María por la estación CHSV3 (punto verde). Anomalías de TSM en °C con respecto a los valores de (a), para las 48 y 24 horas anteriores (b-c) y posteriores (d-e) al paso más cercano del huracán por la estación. En el título de cada panel se indica la categoría del huracán a*

las 1200 UTC del día correspondiente. En todas las figuras se muestra la posición del centro del huracán cada 24 horas (1200 UTC), así como los radios de vientos sostenidos de 63 km h^{-1} (circulo más externo), 90 km h^{-1} y 119 km h^{-1}. 17

Figura 12. *Serie de tiempo profundidad de la capa de mezcla a partir de datos diarios de reanálisis tomados del nodo más cercano de la boya NOAA 42057 para octubre del 2005. La flecha roja indica paso más cercano del huracán Wilma por la boya. 19*

Figura 13. *(a) Campo de profundidad de la capa de mezcla (MLD) el 19 de octubre del 2005 (1200 UTC), al paso más cercano del huracán Wilma por la boya 42057 (punto verde). Anomalías de MLD en m con respecto a los valores de (a), para las 48 y 24 horas anteriores (b-c) y posteriores (d-e) al paso más cercano del huracán por la boya. En el título de cada panel se indica la categoría del huracán a las 1200 UTC del día correspondiente. En todas las figuras se muestra la posición del centro del huracán cada 24 horas (1200 UTC), así como los radios de vientos sostenidos de 63 km h^{-1} (circulo más externo), 90 km h^{-1} y 119 km h^{-1}. 20*

Figura 14. *Serie de tiempo profundidad de la capa de mezcla a partir de datos diarios de reanálisis tomados del nodo más cercano de la boya NOAA 42056 para octubre del 2005. La flecha roja indica paso más cercano del huracán Wilma por la boya. 21*

Figura 15. *(a) Campo de profundidad de la capa de mezcla (MLD) el 21 de octubre del 2005 (1200 UTC), al paso más cercano del huracán Wilma por la boya 42056 (punto verde). Anomalías de MLD en m con respecto a los valores de (a), para las 48 y 24 horas anteriores (b-c) y posteriores (d-e) al paso más cercano del huracán por la boya. En el título de cada panel se indica la categoría del huracán a las 1200 UTC del día correspondiente. En todas las figuras se muestra la posición del centro del huracán cada 24 horas (1200 UTC), así como los radios de vientos sostenidos de 63 km h^{-1} (circulo más externo), 90 km h^{-1} y 119 km h^{-1}. 22*

Figura 16. *Serie de tiempo profundidad de la capa de mezcla a partir de datos diarios de reanálisis tomados del nodo más cercano de la boya NOAA 42058 para octubre del 2016. La flecha roja indica paso más cercano del huracán Matthew por la boya..... 23*

Figura 17. *(a) Campo de profundidad de la capa de mezcla (MLD) el 3 de octubre del 2016 (1200 UTC), al paso más cercano del huracán Matthew por la boya 42058 (punto verde). Anomalías de MLD en m con respecto a los valores de (a), para las 48 y 24 horas anteriores (b-c) y posteriores (d-e) al paso más cercano del huracán por la boya. En el título de cada panel se indica la categoría del huracán a las 1200 UTC del día correspondiente. En todas las figuras se muestra la posición del centro del huracán cada 24 horas (1200 UTC), así como los radios de vientos sostenidos de 63 km h^{-1} (circulo más externo), 90 km h^{-1} y 119 km h^{-1}. 24*

Figura 18. *Serie de tiempo profundidad de capa de mezcla a partir de datos diarios de reanálisis tomados del nodo más cercano de la estación NOAA CHSV3 para septiembre del 2017. La flecha roja indica paso más cercano del huracán María por la boya. 25*

Figura 19. *(a) Campo de profundidad de la capa de mezcla (MLD) el 20 de septiembre del 2017 (1200 UTC), al paso más cercano del huracán María por la estación CHSV3 (punto verde). Anomalías de MLD en m con respecto a los valores de (a), para las 48 y 24 horas anteriores (b-c) y posteriores (d-e) al paso más cercano del huracán por la estación. En el título de cada panel se indica la categoría del huracán a las 1200 UTC del día correspondiente. En todas las figuras se muestra la posición del centro del huracán cada 24 horas (1200 UTC), así como los radios de vientos sostenidos de 63 km h^{-1} (circulo más externo), 90 km h^{-1} y 119 km h^{-1}. 26*

Figura 20. *Serie de tiempo de datos in-situ (cada 60 minutos) de temperatura en la capa superficial del mar obtenidos por la boya NOAA 42059. La flecha gris indica el paso más cercano al centro del huracán Dean por la boya. Tomado de Peña Kalil (2023).* *29*

Figura 21. *Serie de tiempo Profundidad de la Capa de Mezcla a partir de datos diarios de reanálisis tomados del nodo más cercano de la boya NOAA 42059 para agosto del 2007. La flecha gris indica paso más cercano del huracán Dean por la boya. Tomado de Peña Kalil (2023).* *30*

Lista de tablas

Tabla 1. *Frecuencia mensual de ciclones tropicales en el Mar Caribe, Océano Atlántico, Golfo de México entre 1851 a 2020. Los valores en negrilla indican la frecuencia de huracanes para los meses de septiembre y octubre en el Mar Caribe. Tomado y modificado de Valderá et al. (2021).* *5*

1. Introducción

Los huracanes son sistemas de baja presión atmosférica, que se caracterizan por presentar velocidades de vientos sostenidos mayores a 119 km h^{-1}, los cuales producen lluvias extremas, marejadas ciclónicas y fuerte oleaje (Park et al., 2021; Wang et al., 2023). Se caracterizan por presentar una circulación cerrada alrededor de un centro de baja presión atmosférica, el cual es estimulado por el calor generado debido al aire húmedo que asciende y posteriormente se condensa (Ortiz, 2007; Ortiz & Mercado, 2006). Los huracanes tropicales, se forman y desarrollan en las aguas cálidas tropicales, provocando grandes daños en las zonas costeras cercanas a su paso (Park et al., 2021; Wang et al., 2023).

Por lo tanto, los escenarios potenciales para la formación de ciclones tropicales son aquellos donde la temperatura superficial del mar (TSM) es mayor a 26°C. Los huracanes que afectan en el Mar Caribe, tienen su génesis mayormente en las perturbaciones atmosféricas que se forman desde el mes de junio en la costa este de África (Ortiz, 2007). Adicionalmente, una baja cizalladura del viento en la parte alta de la atmósfera y el efecto de la rotación de la tierra (efecto Coriolis) son determinantes para su formación y trayectoria (Kerry, 2003; Emanuel, 1987).

La clasificación de los ciclones tropicales se encuentra determinada por la velocidad máxima de ráfagas de viento, la cual es determinada a una altura de 10 m sobre el nivel medio del mar. Si las ráfagas de viento emitidas son menores a 64 km h^{-1}, estas se denominan depresión tropical, mientras que si las velocidades oscilan entre 64 a 118 km h^{-1} se conocen como tormentas tropicales, velocidades mayores a 119 km h^{-1} se denominan huracanes en el Océano Atlántico y noreste del Océano Pacifico, y tifones en el noroeste de Océano Pacifico y el Océano Índico (Kerry, 2003).

La temporada de actividad ciclónica es diferente dependiendo del lugar de formación. En el Pacifico Noroeste la temporada inicia a mediados de mayo y termina a finales de noviembre. Sin embargo, los tifones se presentan con mayor frecuencia entre los meses de junio a noviembre. En el océano Índico son más frecuentes en los meses de abril hasta diciembre. Esta estacionalidad se relaciona con mayores valores de la TSM. En el Atlántico la temporada de huracanes va desde principios de junio hasta finales de noviembre (Hastenrath, 1984; Ramsay, 2017).

El Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, 2012), concluyó que posiblemente la frecuencia de los ciclones tropicales de categoría mayor (4 y 5), se incremente en el futuro producto del calentamiento global (Knutson et al. 2010). Además, Bustos Usta & Torres Parra (2021) argumentaron que este aumento en TSM podría alargar la temporada de huracanes en el Mar Caribe.

Los ciclones tropicales resultan de procesos de interacción océano-atmósfera. Así como la TSM intensifica la baja presión atmosférica, fortaleciendo los vientos ciclónicos, también los huracanes afectan la capa superior del océano. La profundidad de la capa de mezcla (MLD) del océano es importante, ya que define la región superficial casi homogénea verticalmente en densidad, temperatura y salinidad (Chen et al., 1994; Kara et al., 2000; de Boyer Montégut et al., 2004). Además, la capa de mezcla se da por la manifestación de fuertes procesos de mezcla turbulenta presentes en la parte superficial del océano. El espesor establece la inercia mecánica y contenido de calor que interactúa de forma directa con la atmósfera (de Boyer Montégut et al., 2004).

En el Mar Caribe, las aguas superficiales diluidas se caracterizan por ser aguas cálidas que se relacionan con la fuerte estabilidad estática (Torres Posada, 2023). Además, en el Caribe se suele formar la denominada “Capa barrera”, en la cual la base de la picnoclina es más somera que la base de la termoclina, la cual está relacionada con una estabilidad estática mayor, que generan una reducción en el transporte de agua fría a la capa de mezcla forzada por el viento ciclónico del huracán (de Boyer Montégut et al., 2007; Ruiz-Ochoa et al., 2012; Ke-xin & Fei., 2022).

En el hemisferio norte, el hundimiento de la capa de mezcla se da producto de la convergencia de aguas superficiales, que generan una sobreelevación del nivel mar, provocando que aguas superficiales sean empujadas hacia zonas más profundas (hundimiento de la termoclina) (**Figura 1**). Este proceso provoca zonas de baja productividad debido a que el espesor de la capa con pocos nutrientes se profundiza (Webb, 2019). Por su parte, el asomeramiento de la capa de mezcla es provocado por la divergencia de aguas superficiales, provocando que agua fría subsuperficial ascienda y compense el agua superficial que es removida (ascenso de agua proveniente de la termoclina) (**Figura 1**) (Webb, 2019). El ascenso de agua rica en nutrientes debajo de la zona eufótica a la superficie, mejora la producción primaria al causar floraciones de fitoplancton, como sucede posterior al paso de un ciclón

(McGee et al., 2018; Pan et al., 2018; Wang et al., 2008; Webb, 2019). La divergencia forzada por los ciclones es causada por los vientos ciclónicos (contra las manecillas del reloj en el hemisferio norte), provocando que el transporte de Ekman desplace agua afuera del ciclón, forzando el afloramiento de aguas más frías y asomeramiento de la capa de mezcla (Beesley et al. 2008 & Webb, 2019).

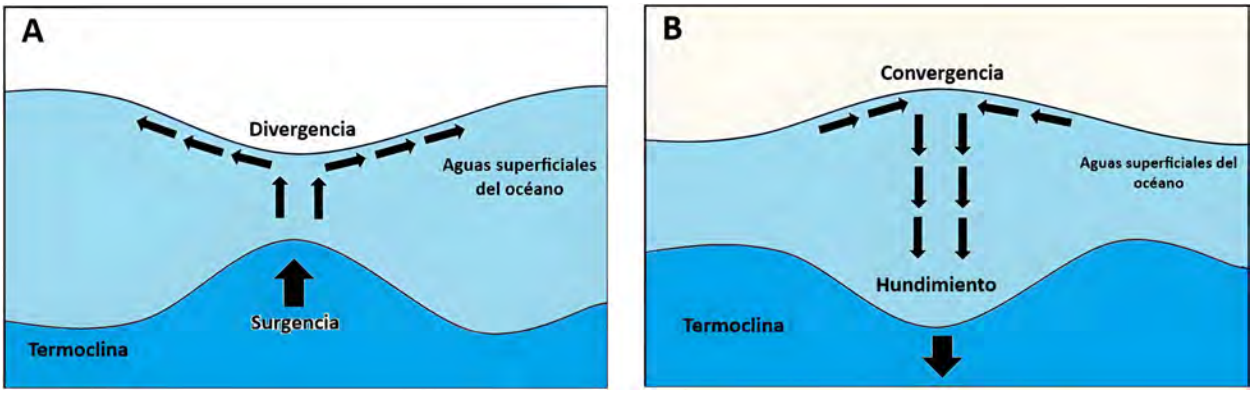

Figura 1. (a) *Divergencia o surgencia de agua fría profunda sobre la superficie del océano (upwelling), y* ***(b)*** *convergencia o hundimiento de la termoclina (downwelling). Tomado y modificado de Waldman (2018) & Beesley et al (2008).*

Peña Kalil (2023) estudió el efecto del huracán Dean (2005) en la TSM y MLD durante su paso por el Mar Caribe, empleando datos de boyas oceanográficas, reanálisis y modelos de asimilación de datos satelitales. En este trabajo se reportó que los efectos de enfriamiento de la TSM, predominan en la etapa de relajamiento, después de la disipación del viento del ciclón tropical (Peña Kalil, 2023). Además, en zonas con menor estabilidad estática, habrá un aumento en la succión de Ekman, facilitando el transporte de agua fría profunda a la superficie del océano (Peña Kalil, 2023).

Teniendo en cuenta lo anterior, esta investigación se desarrolla con el fin de responder la siguiente pregunta de investigación: ¿Cuál es el efecto del paso de los huracanes Wilma (2005), Matthew (2016) y María (2017) en la Temperatura Superficial del Mar y Profundidad de la Capa de Mezcla del Mar Caribe?

Responder esta pregunta es importante, ya que se conoce poco sobre el efecto de los huracanes en la TSM y su relación con la succión de Ekman (debido a los vientos ciclónicos) y la estabilidad estática de la capa superior del océano, ambos presentando variaciones temporales y espaciales. Este proceso de interacción océano-atmósfera, tiene un efecto en la mezcla vertical del océano, transporte de sedimentos en el fondo (transparencia de momento del ciclón) y la

biósfera. Esto último debido a que la succión de agua subsuperficial transporta nutrientes a la superficie del océano (Mann, 2005).

Además, Peña Kalil (2023) estudió la incidencia de Dean (2005) al pasar cerca de una boya con registro de datos in-situ. En este trabajo se complementa la anterior investigación, estudiando tres huracanes en el momento en que pasaron próximos a cuatro ubicaciones con toma de datos in-situ (**Figura 2**). Estos datos permitirán conocer mejor los efectos en la mezcla vertical de las capas superficiales del océano forzadas por el paso de cada huracán.

La pregunta de investigación se limita al Mar Caribe, con el fin de estudiar la interacción océano-atmósfera de este tipo de eventos extremos en este contexto particular. El mar Caribe se encuentra ubicado en la zona de convergencia intertropical entre 7°N y 23°N (**Figura 2**), presentando limites zonales en 60°W y 90°W (Torres Parra et al., 2023). Limitando al sur con Suramérica, al este con las Antillas Menores, al norte con el Golfo de México y Antillas Mayores y al oeste con Centroamérica.

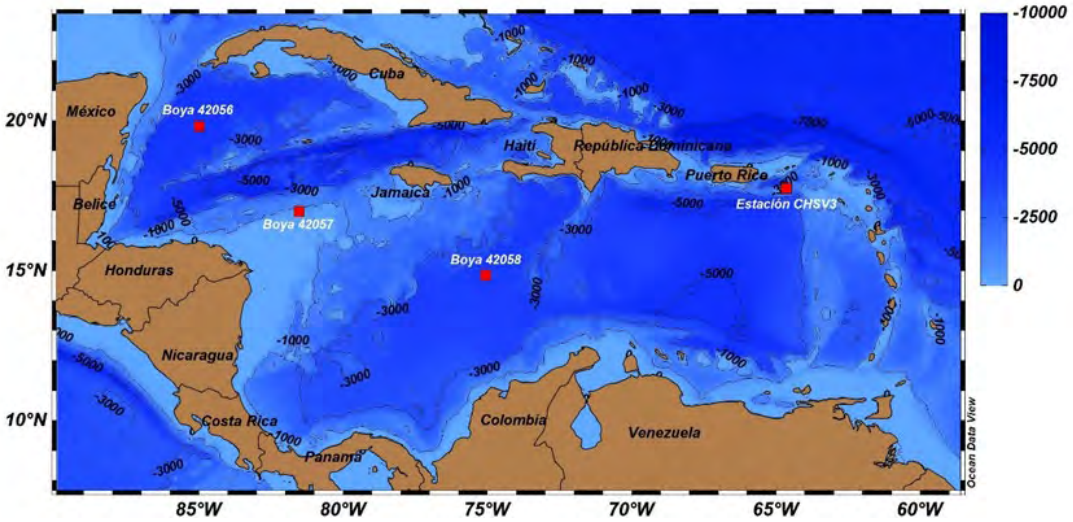

Figura 2. *Zona de estudio (Mar Caribe) con isobatas de 1000, 2000 y 3000 metros. Los puntos rojos indican la ubicación de las Boyas y Estaciones Oceanográficas (NOAA). Batimetría de GEBCO.*

En el Caribe la migración latitudinal de la Zona de Convergencia InterTropical (ZCIT) rige la estacionalidad y provoca un control en los patrones de TSM, vientos y precipitaciones. Entre agosto a noviembre la ZCIT se posiciona sobre el Mar Caribe, provocando un debilitamiento en los alisios del norte y generando la época húmeda en el Caribe (Andrade-Amaya, 2000; Amador 2008), en la cual la TSM es mayor (Torres Parra et al., 2023). Por lo anterior, la temporada de huracanes es más intensa en septiembre y octubre (**Tabla 1**).

Cuenca	Estadígrafo (1851 – 2020)	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV
Área oceánica del Atlántico	Frec	22	75	296	406	172	53
Mar Caribe	Frec	25	14	57	**57**	**111**	33
Golfo de México	Frec	50	40	55	97	44	2

Tabla 1. *Frecuencia mensual de ciclones tropicales en el Mar Caribe, Océano Atlántico, Golfo de México entre 1851 a 2020. Los valores en negrilla indican la frecuencia de huracanes para los meses de septiembre y octubre en el Mar Caribe. Tomado y modificado de Valderá et al. (2021).*

El efecto de los huracanes en la TSM del Mar Caribe se estudió a partir de tres ciclones. El huracán Wilma que afectó al Mar Caribe en 2005 **(Figura 3)**. El 14 de octubre se formó, el 15 de octubre a las 1800 UTC se convirtió en depresión tropical ubicado a 351 km al este de Gran Caimán, el 17 de octubre a las 0600 UTC se fortaleció convirtiéndose en tormenta tropical. El 19 de octubre a las 0600 UTC Wilma alcanzó la máxima categoría con vientos de 277.8 km h^{-1}. Por lo tanto, en 24 horas paso de tormenta tropical a huracán categoría 5. La velocidad máxima de viento se alcanzó a las 1200 UTC con ráfagas de 296.32 km h^{-1} y una presión central de 882 hPa. Se mantuvo en categoría 5 hasta el 20 de octubre, luego tuvo un debilitamiento con vientos de 240.76 km h^{-1} pasando a categoría 4. A medida que se movía al Golfo de México sus vientos disminuyeron hasta 157.4 km h^{-1} el 23 de octubre a las 0000 UTC. A partir de esta fecha, Wilma continuó en el Golfo de México e incluso llegó al Atlántico Norte (Pasch et al. 2006).

Matthew fue un huracán del 2016 que se formó en el Atlántico y tuvo un gran impacto (Shultz et al., 2016; Ortiz et al., 2022), en su trayecto por el Caribe (**Figura 3**). Inicio el 23 de septiembre como onda tropical al oeste de África, moviéndose al oeste por el Atlántico a una velocidad de 46.3 km h^{-1}. El 28 de septiembre a las 1400 UTC en su paso al norte de Barbados, se intensificó alcanzando vientos de 92.6 km h^{-1}. A las 1200 UTC se convirtió en una tormenta tropical desplazándose al oeste del Mar Caribe. El 29 de septiembre a las 1800 UTC alcanzó el estado de huracán a 305 km de Curazao. En las siguientes 24 horas Matthew se fortaleció pasando a huracán categoría 5. El 1 de octubre a las 0000 UTC se registraron vientos de 268.5 km h^{-1} pasando a 148 km de Punta Gallinas, Colombia, con una presión de 942 hPa como categoría 5. El 2 de octubre entre las 0600 y 1800 UTC Matthew se debilitó (vientos de 231.5 km h^{-1}), y luego alcanzó una máxima intensidad con vientos de 250 km h^{-1} y presión central de

943 hPa. El 4 de octubre a las 1100 UTC sus vientos eran de 240.8 km h^{-1}, siendo nuevamente categoría 4. Los días siguientes al 6 de octubre empezó a debilitarse lentamente, saliendo del Mar Caribe y llegando al Atlántico Norte (Stewart, 2017).

María fue un huracán que se movió al noreste de Mar Caribe en el 2017 (**Figura 3**). Inició el 12 de septiembre al 16 de septiembre a las 1200 UTC como una onda tropical generada en la costa oeste de África. El 17 de septiembre a las 1800 UTC se intensifico convirtiéndose en huracán categoría 4 al este de las Antillas Menores. Las altas TSM provocaron que el huracán se fortaleciera el 18 de septiembre a las 1200 UTC con vientos de 185.2 km h^{-1}. El 19 de septiembre a las 0115 UTC se convirtió en huracán categoría 5 con vientos de 268.54 km h^{-1} y presión central de 922 hPa. Para el 20 de septiembre a las 1015 UTC, el huracán presentó un ligero debilitamiento con vientos por debajo del umbral de categoría 5, saliendo del Mar Caribe. A partir del 22 de septiembre, María continuó moviéndose en el Atlántico Norte (Pasch et al., 2023).

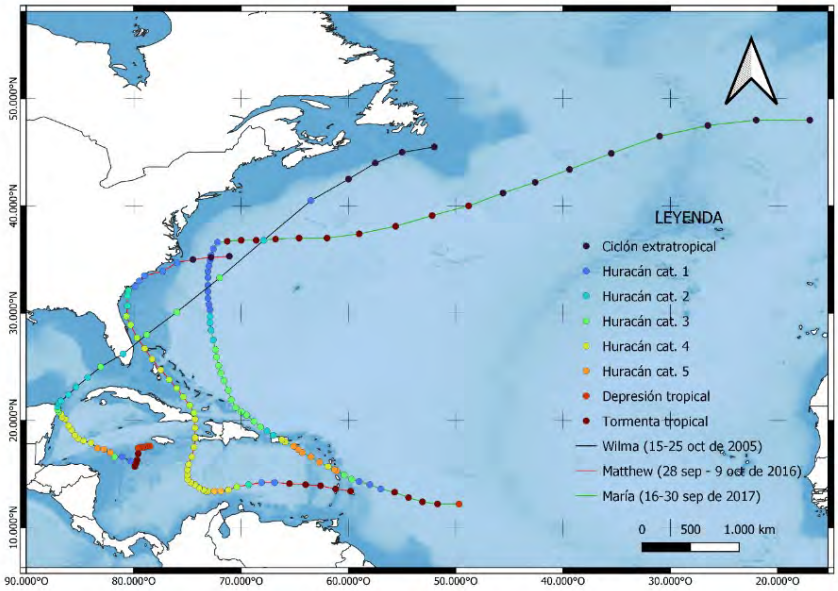

***Figura 3**. Trayectoria huracanes Wilma (2005), Matthew (2016) y María (2017), junto con sus escenarios según escala de Saffir-Simpson. Datos tomados del International Best Track Archive for Climate Stewardship (IBTrACS).*

2. Objetivos

2.1 Objetivo general

Analizar los cambios en la Temperatura Superficial del Mar y Profundidad de la Capa de Mezcla en el Mar Caribe, causados por el paso de los huracanes Wilma (2005), Matthew (2016) y María (2017).

2.2 Objetivos específicos

1. Registrar el efecto de los huracanes en la Temperatura Superficial del Mar y Profundidad de la Capa de Mezcla antes, durante y después del paso cercano a las boyas y estaciones oceanográficas.
2. Analizar las diferencias del efecto de los huracanes en la Temperatura Superficial del Mar y Profundidad de la Capa de Mezcla, según su ubicación, trayectoria, características atmosféricas y oceanográficas al momento de los eventos.

3. Datos y Metodología

Para estudiar el efecto de los huracanes en la TSM se emplearon diversas fuentes de datos y se realizó un estudio riguroso de los informes preliminares e históricos emitidos por el Centro Nacional de Huracanes que permitieron identificar características importantes durante la trayectoria de los siguientes huracanes: Wilma del 2005, Matthew del 2016 y María del 2017. Además, Se recopilaron datos del proyecto International Best Track Archive for Climate Stewardship (IBTrACS), creado por el Centro Nacional de Datos Climáticos de la NOAA con ayuda del Centro Mundial de Datos Meteorológicos de Asheville, para obtener datos históricos y recientes de cada uno de los Centros Meteorológicos Regionales Especializados (CMRE). Este proyecto abarca datos desde 1840 hasta 2023 cada 3 horas (https://doi.org/10.25921/82ty-9e16) disponibles por subconjuntos, cuencas o periodos de tiempo en formato NetCDF-4, CSV y Shapefile con información de radios de influencia, posición, presión máxima y mínima, vientos y velocidad del huracán.

Los datos in-situ de TSM se obtuvieron de las boyas oceanográficas y estaciones meteorológicas del National Data Buoy Center (NDBC, por sus siglas en inglés) ubicadas en el Mar Caribe. Las boyas toman datos de temperatura superficial en grados Celsius y cuentan con un sensor oceanográfico (Self-Contained Ocean Observations Payload, SCOOP) que permite la medición de variables como temperatura del agua y aire, viento y oleaje. Además, se distinguen 2 tipos de boyas: 3-meter foam buoy, construida con material de espuma de

polietileno de alta resistencia en forma cilíndrica, y 3-meter discus buoy, construida con material de aluminio en forma de disco (Sprigg et al., 1998).

Para Wilma, se usaron los datos entre el 10 a 31 de octubre del 2005 tomados por dos boyas oceanográficas. La boya 42056 de tipo 3-meter foam buoy ubicada en 19.82°N y 84.94°W (**Figura 1**), la cual toma datos de TSM cada hora a 1.5 m por debajo de la línea de flotación y la boya 42057 de tipo 3-meter discus buoy ubicada en 16.97°N y 81.57°W (**Figura 1**), la cual toma datos de TSM cada hora a 2 m por debajo de la línea de flotación.

Para Matthew, se utilizaron los datos recopilados entre el 25 de septiembre al 14 de octubre del 2016 tomados por la boya oceanográfica 42058 de tipo 3-meter discus buoy ubicada en 14.84°N y 75.06°W (**Figura 1**), la cual toma datos de TSM cada 50 minutos a 2 m por debajo de la línea de flotación.

Para María, se usaron los datos entre el 13 de septiembre al 2 de octubre del 2017 tomados por la estación meteorológica CHSV3 ubicada en 17.74°N y 64.69°W. Esta es una red de observación del nivel del agua en propiedad del Servicio Nacional Oceánico de la NOAA, la cual toma datos de TSM en grados Celsius cada seis minutos a 1.2 m por debajo del datum "Promedio de más bajas bajamares" (Mean Lower Low Water, MLLW, por sus siglas en inglés).

Los datos de TSM en el área de estudio se obtuvieron del producto de datos de reanálisis CMEMS OSTIA del Servicio Marino de Copernicus (https://doi.org/10.48670/moi-00168), creado a partir del sistema de Análisis Operacional de la TSM y Hielo Marino (OSTIA, por sus siglas en ingles). Este producto asimila datos in-situ del HadIOD y datos reprocesados por los satelitales CCI, C3S, EUMETSAT y REMSS de TSM de la Agencia Espacial Europea (ESA, por sus siglas en ingles). Además, proporciona una estimación de la TSM base sin considerar los cambios de TSM durante la variabilidad diurna en unidades Kelvin. La resolución espacial se suministra en cuadrículas regulares globales completas de 0.05° (~5 km), y resolución temporal diaria desde 1981 hasta 2022. El procesamiento es L4 o Nivel 4 de alta resolución en formato NetCDF-4.

Finalmente, para analizar la influencia de cada huracán en la MLD, se obtuvieron datos del modelo numérico de reanálisis oceánico Global Physics Reanalysis (https://doi.org/10.48670/moi-00021), el cual tiene como objetivo la simulación oceánica global que inició en los años 90 con el lanzamiento de los satélites TOPEX POSEIDON y ERS-

1. Actualmente, este modelo se apoya del sistema de predicción y modelado global CMEMS - NEMO y reanálisis de ERA5, ERA-Interim y ECMWF. La profundidad de la capa de mezcla se define por un cambio en densidad con respecto al valor observado a 10 m de profundidad. Este cambio de densidad corresponde al aumento de la densidad cuando la temperatura a 10 m disminuye 0.2°C, manteniendo el valor de salinidad a 10 m de profundidad. La resolución horizontal es de 0.08° (~8 km), y 50 niveles verticales que van desde los 0 a 5500 m de profundidad. La resolución temporal de los datos es diaria y mensual desde 1992 hasta 2023 en unidades de metros y formato NetCDF-4.

El procesamiento de datos se realizó utilizando el lenguaje de programación Python, software de análisis y visualización de datos oceanográficos Ocean Data View y QGIS. Se generaron series de tiempo en un intervalo de 20 y 11 días para analizar el comportamiento de la temperatura en la capa superficial del mar y MLD para los huracanes Wilma, Matthew y María a partir de datos in-situ y reanálisis obtenidos por las boyas oceanográficas (42056, 42057, 42058), estación meteorológica (CHSV4), y nodos más próximos a cada boya y estación.

Con los datos del modelo de reanálisis se realizaron mapas de TSM y profundidad de la capa de mezcla correspondientes al día en que se presentó el paso más próximo de Wilma, Matthew y María por las boyas oceanográficas y estaciones meteorológicas. Para mostrar las diferencias espaciales, se incluyeron mapas de las anomalías de TSM y profundidad de la capa de mezcla para las 48 y 24 horas anteriores y posteriores al paso más próximo del huracán. Las anomalías se calcularon restándole al valor del día previo/posterior el valor de referencia (día del paso más próximo del huracán a la boya). Por tanto, las anomalías negativas (positivas) indican que la temperatura/profundidad de la capa de mezcla era menor (mayor) que el día de referencia.

En estos mapas se incluyeron las trayectorias de los ciclones tropicales, posiciones diarias y radios máximos de vientos sostenidos a las 1200 UTC. En las figuras de planta se incluyeron 3 radios de influencia para cada huracán según el día graficado, los cuales corresponden a vientos mayores a 63 km h^{-1}, 90 km h^{-1} y 119 km h^{-1}, respectivamente. Los radios de influencia de cada huracán se generaron en el software QGIS con la función Merge y se descargaron en formato shape.

4. Variaciones de la Temperatura Superficial del Mar al paso de huracanes

Para analizar las variaciones en el área de estudio, se realizaron series de tiempo de temperatura en la capa superficial del mar (**Figuras 4, 6, 8 y 10),** que muestran la incidencia de los huracanes Wilma, Matthew y María, por medio de datos in-situ tomados por las boyas oceanográficas (42056, 42057 y 42058) y estación meteorológica (CHSV3) en un intervalo de 20 días.

4.1 Huracán Wilma (2005)

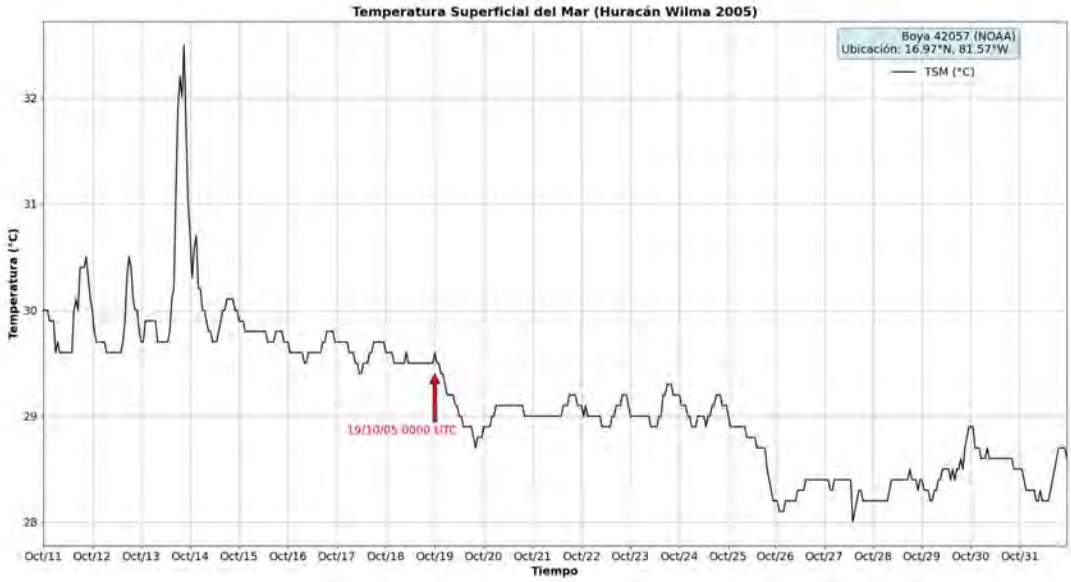

Figura 4. *Serie de tiempo de datos in-situ (cada 60 minutos) de temperatura en la capa superficial del mar obtenidos por la boya 42057 (NOAA). La flecha roja (fecha y hora) indica el paso más cercano al centro del huracán Wilma por la boya.*

La **Figura 4** muestra la respuesta en la temperatura de la capa superficial del mar durante el paso del huracán de máxima categoría Wilma (2005). Para el 11 y 18 de octubre (días previos al paso del huracán) se observan cambios en la temperatura entre 29.5°C y 32.4°C, este último valor correspondiente a un pico el 13 de octubre. El momento más cercano de Wilma por la boya NOAA 42057 evidencia una disminución en la temperatura de aproximadamente 0.8°C, al cambiar de 29.5°C a 28.7°C el 19 de octubre. Para el 20 de octubre el efecto de enfriamiento del huracán finaliza, sin embargo, la temperatura queda aproximadamente 1°C por debajo de los valores previos. Además, la menor temperatura registrada corresponde al 27 de octubre, con un valor de 28°C.

El enfriamiento en la temperatura de la capa superficial del mar asociado a un evento extremo, se evidenció siendo Wilma un huracán de máxima categoría, con vientos de ~90 km

h^{-1} cerca de la boya (**Figura 5a**). Posterior a su paso, destaca un enfriamiento de 0.6°C entre 25 y 26 de octubre, tomando temperaturas más bajas a las registradas durante la incidencia del huracán.

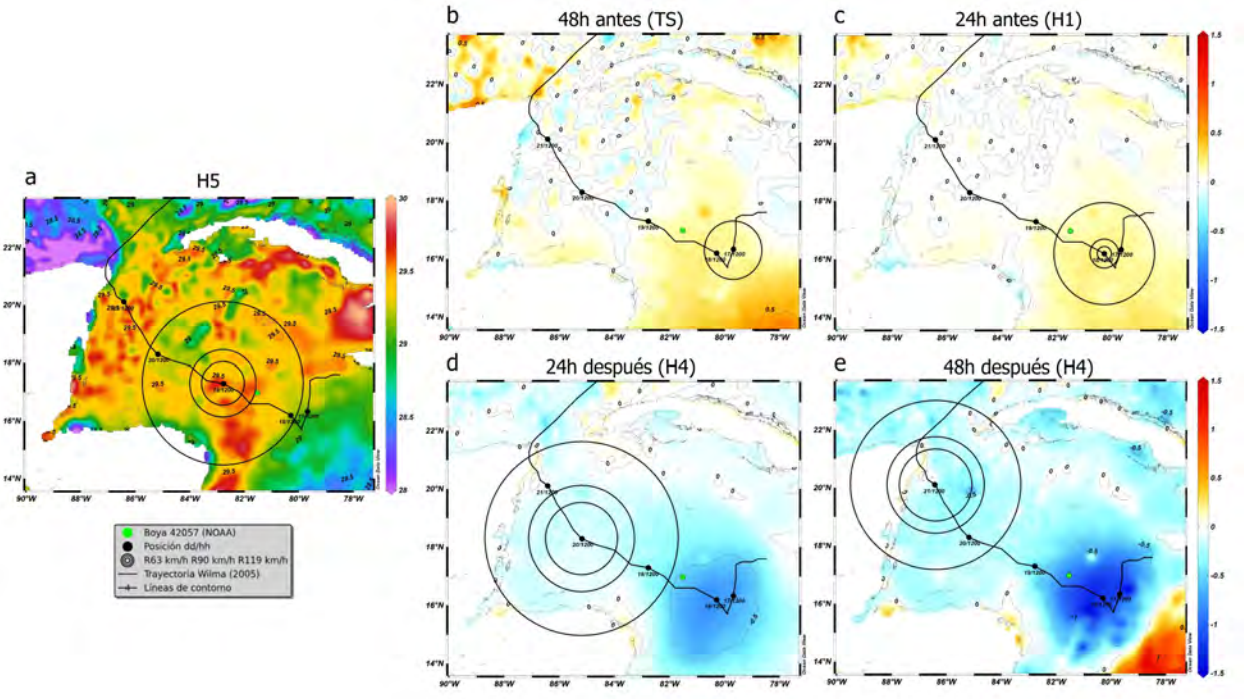

Figura 5. (a) *Campo de TSM el 19 de octubre del 2005 (1200 UTC), al paso más cercano del huracán Wilma por la boya 42057 (punto verde). Anomalías de TSM en °C con respecto a los valores de* ***(a)****, para las 48 y 24 horas anteriores* ***(b-c)*** *y posteriores* ***(d-e)*** *al paso más cercano del huracán por la boya. En el título de cada panel se indica la categoría del huracán a las 1200 UTC del día correspondiente. En todas las figuras se muestra la posición del centro del huracán cada 24 horas (1200 UTC), así como los radios de vientos sostenidos de 63 km h^{-1} (circulo más externo), 90 km h^{-1} y 119 km h^{-1}.*

El 19 de octubre de 2005 el centro del huracán Wilma pasó por la posición más cercana a la boya NOAA 42057 como huracán de máxima categoría. Los valores de TSM se observan entre 28°C y 30°C (**Figura 5a**), estando las temperaturas más altas sobre el Mar Caribe, y las más bajas en el Golfo de México con valores entre 28°C y 29°C. Sobre la boya se observan temperaturas de ~29.7°C.

2 días antes del paso más cercano a la boya, Wilma era una depresión tropical y su centro se posicionaba al norte de la Cuenca Colombia. Un día antes, el huracán alcanzó la categoría 1, y continuaba moviéndose al norte de la Cuenca Colombia (**Figura 5 b-c**). En ambos días se observan anomalías de hasta 0.5°C con respecto del 19 de octubre, indicando el enfriamiento en la TSM por efecto del huracán. De forma similar, dos días después al paso más cercano del huracán por la boya, este fue de categoría 4 (**Figura 5 d-e**), mostrando sobre su trayectoria un

enfriamiento de hasta -1°C con respecto al 19 de octubre. Por tanto, a lo largo de su trayectoria en los 5 días analizados, se observa un enfriamiento de -1.5°C, el cual fue mayor al sureste de la boya, y será discutido en la sección de resultados.

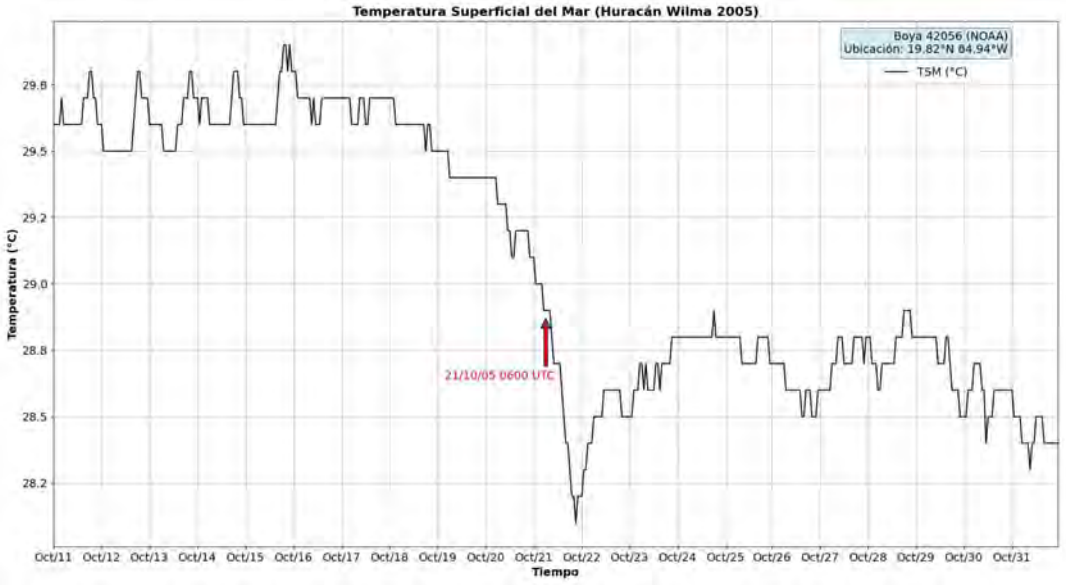

Figura 6. *Serie de tiempo de datos in-situ (cada 60 minutos) de temperatura en la capa superficial del mar obtenidos por la boya 42056 (NOAA). La flecha roja (fecha y hora) indica el paso más cercano al centro del huracán Wilma por la boya.*

En la **Figura 6** se observa la respuesta en la temperatura de la capa superficial del mar, provocada por el paso del huracán Wilma (2005) como categoría 4. Entre el 11 y 18 de octubre (días previos al paso del huracán) se observa una variación en la temperatura entre 29.5°C y 30.1°C, presentando su pico máximo el 15 de octubre. Al momento del paso de Wilma por la boya NOAA 42056, muestra una disminución en la temperatura de aproximadamente 1.7°C, al pasar de 29.7°C a 28°C entre el 18 y 21 de octubre. El 24 de octubre termina el efecto de enfriamiento provocado por el huracán de forma directa, sin embargo, la temperatura posterior al paso del huracán es ~1.2°C menor a los días previos. La menor temperatura registrada corresponde al 21 de octubre (durante la incidencia del huracán) con un valor de 28°C.

Se destaca que siendo Wilma un huracán de menor categoría, el efecto de enfriamiento en la temperatura de la capa superficial del mar fue mayor al obtenido por la boya NOAA 42057 (categoría 5) (**Figura 4**). Sin embargo, este generó un viento de ~119 km h^{-1} cerca de la boya (**Figura 7a**). Este comportamiento será analizado en la discusión de resultados.

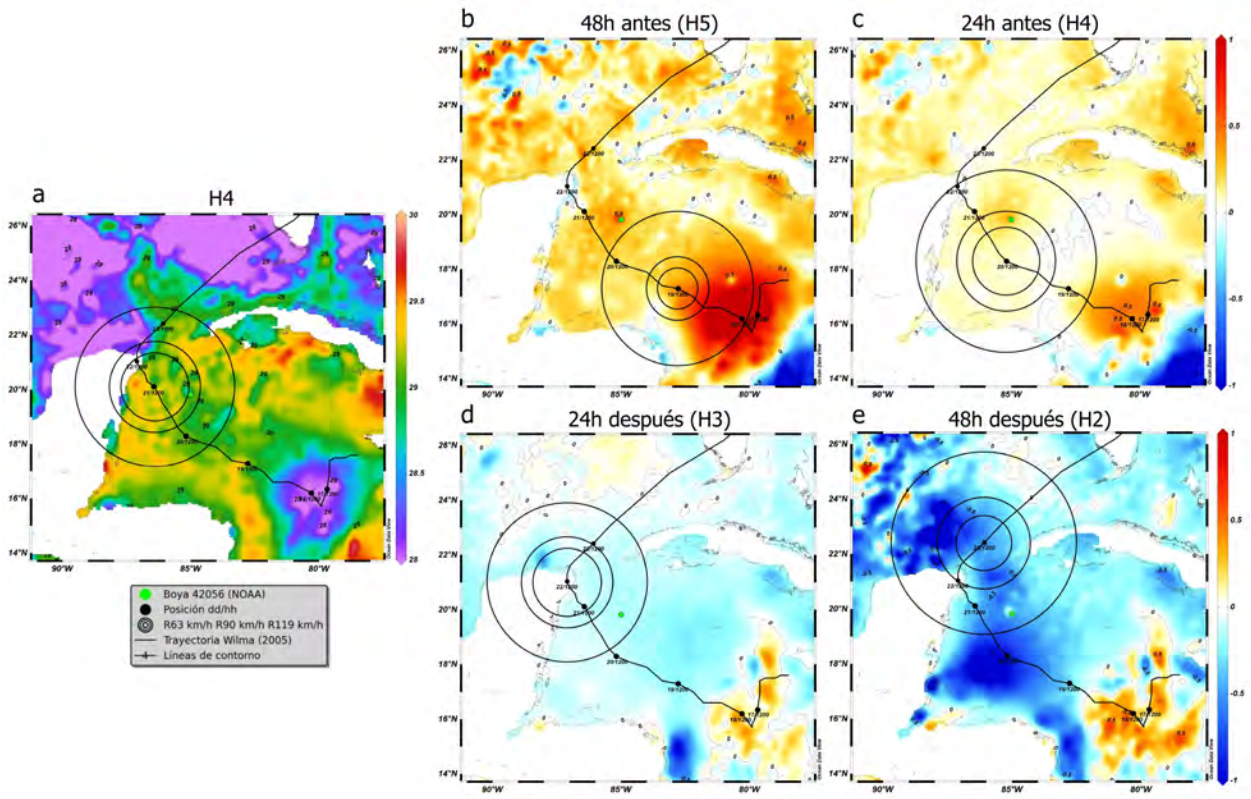

Figura 7. ***(a)*** *Campo de TSM el 21 de octubre del 2005 (1200 UTC), al paso más cercano del huracán Wilma por la boya 42056 (punto verde). Anomalías de TSM en °C con respecto a los valores de* ***(a)****, para las 48 y 24 horas anteriores* ***(b-c)*** *y posteriores* ***(d-e)*** *al paso más cercano del huracán por la boya. En el título de cada panel se indica la categoría del huracán a las 1200 UTC del día correspondiente. En todas las figuras se muestra la posición del centro del huracán cada 24 horas (1200 UTC), así como los radios de vientos sostenidos de 63 km h^{-1} (circulo más externo), 90 km h^{-1} y 119 km h^{-1}.*

Continuando con el análisis del huracán Wilma (2005), el 21 de octubre de 2005 el centro del huracán pasó por la posición más próxima a la boya NOAA 42057 como huracán categoría 4. En este campo los valores de TSM oscilan entre 28°C y 30°C (**Figura 7a**), estando las temperaturas más altas sobre el Mar Caribe, y las más bajas en el Golfo de México y al sureste de la trayectoria con valores entre 28°C y 29°C. Sobre la boya se observan temperaturas de ~29°C.

2 días antes del paso más cercano a la boya, Wilma era un huracán de máxima categoría y su centro se posicionaba al noreste de Nicaragua. Un día antes, el huracán ya de categoría 4, continuaba desplazándose por el Mar Caribe (**Figura 5 b-c**). En ambos días se observan anomalías de hasta 1°C con respecto del 21 de octubre, siendo esta la TSM que disminuyó por efecto de la succión de Ekman forzada por el paso huracán. Asimismo, dos días después al paso más cercano del huracán por la boya, este disminuyó a un huracán de categoría 2 (**Figura 5 d-**

e), mostrando sobre su trayecto un enfriamiento de hasta -1°C en el Mar Caribe y Golfo de México. Por tanto, durante toda su trayectoria se evidencia un enfriamiento de -2°C.

Cabe destacar que el enfriamiento evidenciado en la **Figura 5** se produjo en un área más local, en comparación de la **Figura 7**, en donde el enfriamiento abarca gran parte del Mar Caribe y Golfo de México.

4.2 Huracán Matthew (2016)

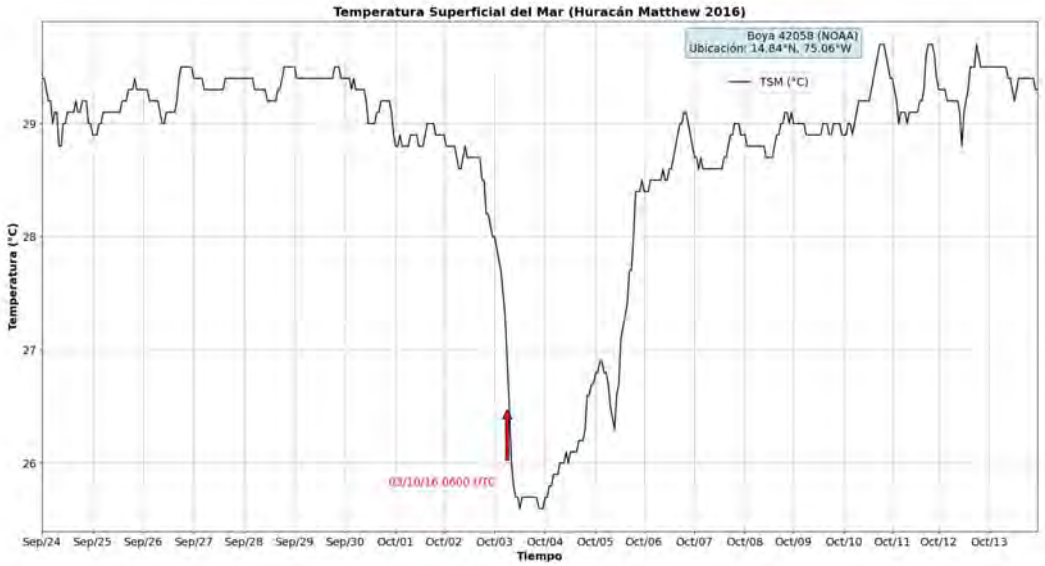

Figura 8. *Serie de tiempo de datos in-situ (cada 50 minutos) de temperatura en la capa superficial del mar obtenidos por la boya 42058 (NOAA). La flecha roja (fecha y hora) indica el paso más cercano al centro del huracán Matthew por la boya.*

En la **Figura 8** se muestra la respuesta en la temperatura de la capa superficial del mar por el paso del huracán Matthew (2016) como categoría 4, con un viento >119 km h^{-1} cerca de la boya, ya que el centro del huracán pasó sobre esta (**Figura 9a**) Para el 24 y 30 de septiembre (días previos al paso del huracán) se observan variaciones en la temperatura entre 28.8°C y 29.5°C. El momento del paso de Matthew por la boya NOAA 42058 evidencia una disminución en la temperatura de aproximadamente 3.6°C, al pasar de 29.2°C a 25.6°C entre el 30 septiembre y 3 de octubre. Para el 6 de octubre el efecto de enfriamiento del huracán finaliza, y se evidencia un pico máximo de 29.8°C el 11 de septiembre. A diferencia de Wilma, el enfriamiento no se mantiene en la boya después del paso del huracán. La menor temperatura registrada corresponde al 3 de octubre (durante la influencia del huracán), con un valor de 25.6°C.

El enfriamiento en la temperatura de la capa superficial del mar se evidenció siendo Matthew un huracán categoría 4, pero con un viento >119 km h^{-1} cerca de la boya, ya que el centro del huracán pasó sobre esta (**Figura 9a**).

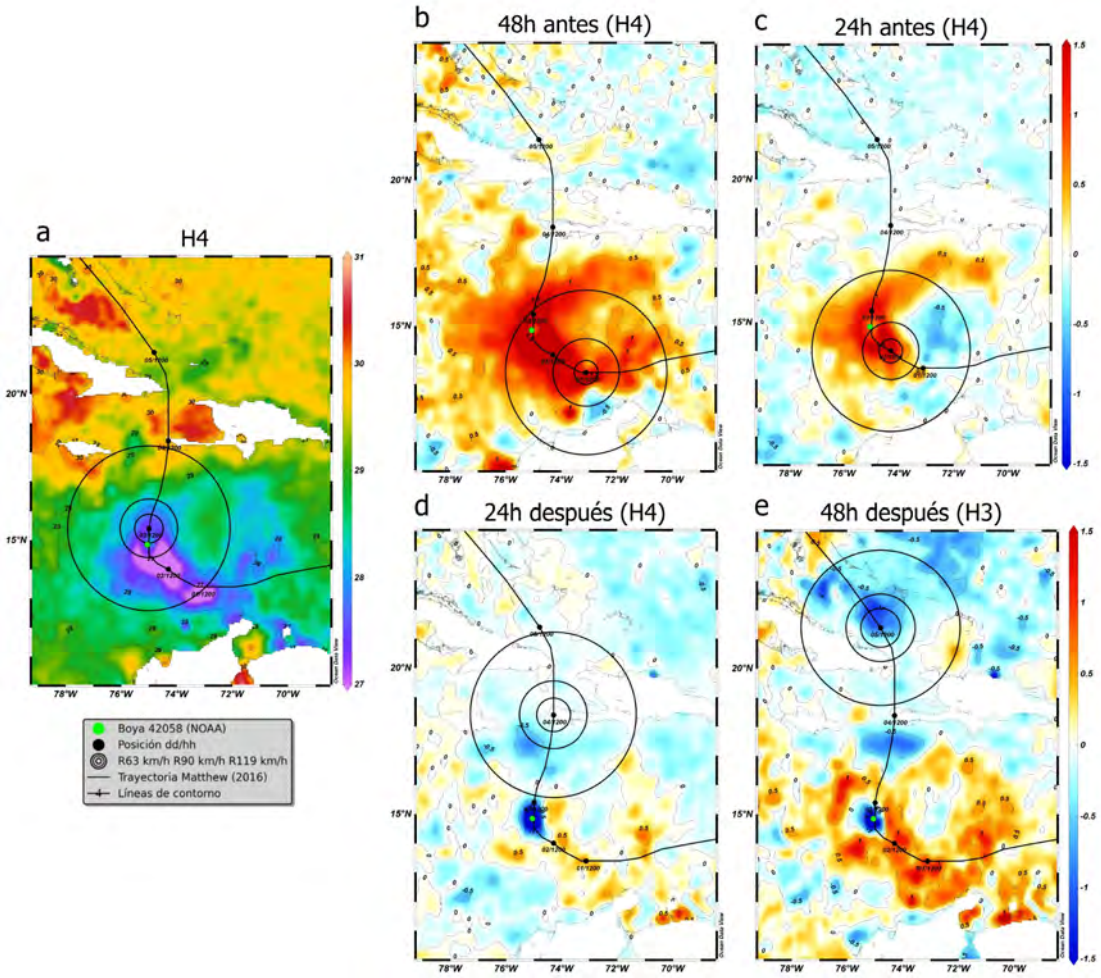

Figura 9. (a) *Campo de TSM el 3 de octubre del 2016 (1200 UTC), al paso más cercano del huracán Matthew por la boya 42058 (punto verde). Anomalías de TSM en °C con respecto a los valores de* ***(a)****, para las 48 y 24 horas anteriores* ***(b-c)*** *y posteriores* ***(d-e)*** *al paso más cercano del huracán por la boya. En el título de cada panel se indica la categoría del huracán a las 1200 UTC del día correspondiente. En todas las figuras se muestra la posición del centro del huracán cada 24 horas (1200 UTC), así como los radios de vientos sostenidos de 63 km h^{-1} (circulo más externo), 90 km h^{-1} y 119 km h^{-1}.*

El 3 de octubre de 2016 el centro del huracán Matthew pasó por la posición más próxima a la boya NOAA 42058 como huracán categoría 4. Los valores de TSM para este día se encuentran entre 27°C y 31°C (**Figura 9a**), estando las temperaturas más altas sobre las Antillas Mayores y Atlántico Norte, las más bajas al norte de Colombia y Venezuela con valores entre 27°C y 29°C. Sobre la boya oceanográfica se observan temperaturas de ~27.6°C. Se puede observar cómo el trayecto previo del huracán Matthew afectó el campo de temperatura

superficial, enfriando las aguas influenciadas por radios de vientos equivalentes a 55 km (119 km h^{-1}), 111 km (90 km h^{-1}) y 314 km (63 km h^{-1}). El enfriamiento fue mayor en el radio de los vientos más intensos >119 km h^{-1}.

2 días antes del paso más cercano a la boya, el huracán era de categoría 4 y se posicionaba al noroeste de Punta Gallinas. Un día antes, el huracán mantuvo su intensidad, y se desplazaba al norte de la Cuenca Colombia (**Figura 9 b-c**). En ambos días se observan anomalías de hasta 1.5°C con respecto del 3 de octubre, siendo esta la TSM que disminuyó por efecto de la succión de Ekman forzada por el paso del huracán. Asimismo, dos días después al paso próximo del huracán por la boya, este disminuyó a un huracán de categoría 3 (**Figura 9 d-e**), mostrando sobre su trayectoria un enfriamiento de hasta -1.5°C. Por tanto, a lo largo de su trayectoria se observa un enfriamiento de -3°C. Notándose un enfriamiento local, es decir sobre las zonas adyacentes a la boya oceanográfica.

Para las 48 y 24 horas anteriores al paso del huracán, el enfriamiento en la capa superficial del mar fue mayor y en un área más extensa de la Cuenca Colombia.

4.3 Huracán María (2017)

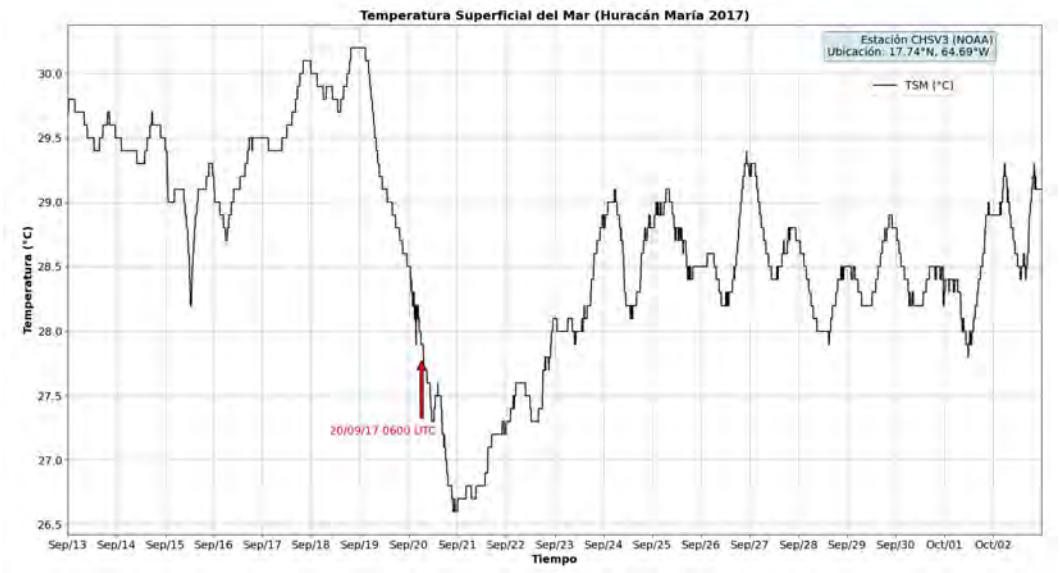

Figura 10. *Serie de tiempo de datos in-situ (cada 6 minutos) de temperatura en la capa superficial del mar obtenidos por la estación CHSV3 (NOAA). La flecha roja (fecha y hora) indica el paso más cercano al centro del huracán María por la boya.*

La **Figura 10** muestra la respuesta en la temperatura de la capa superficial del mar, provocada por el paso del huracán María (2017) como categoría 4, con un viento >119 km h^{-1} cerca de la boya, ya que el centro del huracán pasó sobre esta (**Figura 11a**). Para el 13 y 19 de

septiembre (días previos al paso próximo del huracán) se evidencian variaciones en la temperatura entre 28.2°C y 30.3°C, alcanzando su pico máximo el 19 de septiembre. El momento del paso de María por la estación NOAA CHSV3 muestra una disminución en la temperatura de aproximadamente 3.7°C, al pasar de 30.3°C a 26.7°C entre el 19 y 21 de septiembre. Para el 24 de septiembre el efecto de enfriamiento del huracán termina, sin embargo, al igual que Wilma, la temperatura posterior al paso del huracán es ~1°C inferior, con respecto a los días previos. La menor temperatura registrada corresponde al 20 de septiembre, con un valor de 25.6°C. Cabe destacar, tanto el pico máximo como la menor temperatura, corresponden a los valores registrados durante la incidencia del huracán.

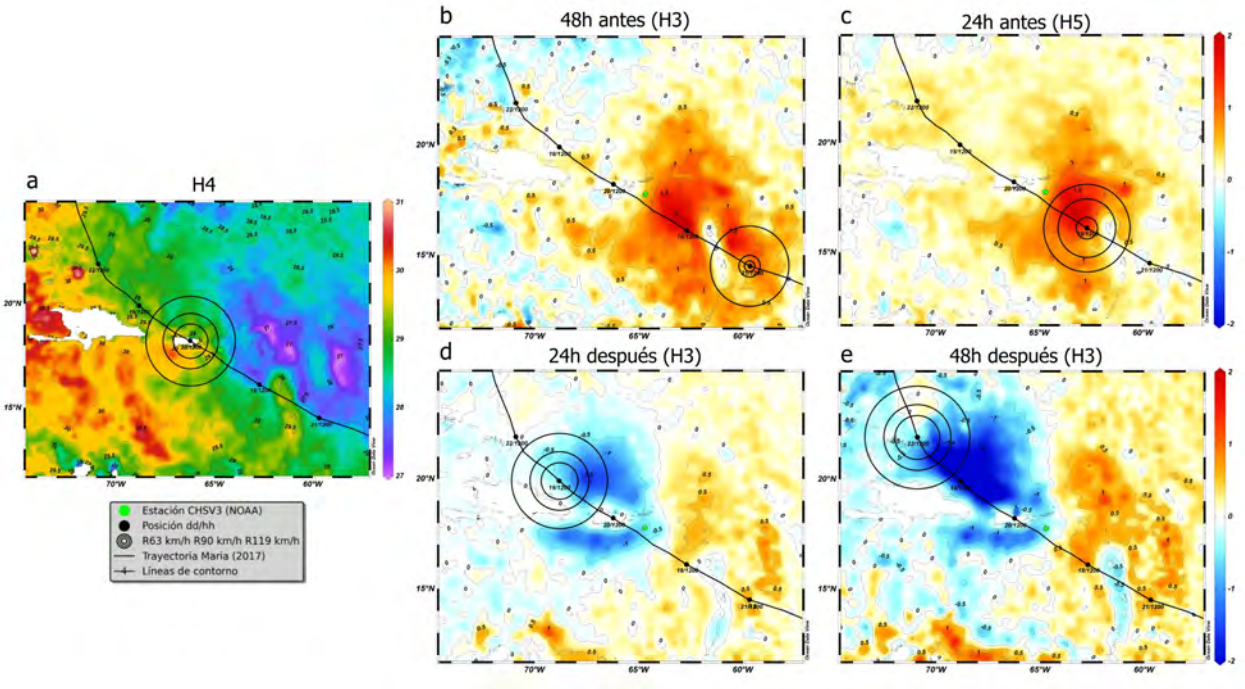

Figura 11. (a) *Campo de TSM el 20 de septiembre del 2017 (1200 UTC), al paso más cercano del huracán María por la estación CHSV3 (punto verde). Anomalías de TSM en °C con respecto a los valores de* ***(a)****, para las 48 y 24 horas anteriores* ***(b-c)*** *y posteriores* ***(d-e)*** *al paso más cercano del huracán por la estación. En el título de cada panel se indica la categoría del huracán a las 1200 UTC del día correspondiente. En todas las figuras se muestra la posición del centro del huracán cada 24 horas (1200 UTC), así como los radios de vientos sostenidos de 63 km h^{-1} (circulo más externo), 90 km h^{-1} y 119 km h^{-1}.*

El 20 de septiembre de 2017 el centro del huracán María pasó por la posición más cercana a la estación NOAA CHSV3 como huracán categoría 4. Los valores de TSM se observan entre 27°C y 31°C (**Figura 11a**), estando las temperaturas más altas sobre el Mar Caribe, y las más bajas en el Atlántico Norte con valores entre 27°C y 29°C. Sobre la estación meteorológica se observan temperaturas de ~28.8°C. Se puede observar en el trayecto previo

del huracán, cómo este posiblemente afectó el campo de temperatura superficial, enfriando mayormente las aguas al noroeste de su paso, con respecto de las aguas al sureste.

2 días antes del paso más cercano a la boya, el huracán era de categoría 3 y se encontraba fuera del Mar Caribe. Un día antes, el huracán ya de categoría 5, ingresaba al Mar Caribe (**Figura 11 b-c**). En ambos días se observan anomalías de hasta 2°C con respecto del 20 de septiembre, siendo esta la TSM que disminuyó por efecto de la succión de Ekman forzada por el huracán. De forma similar, dos días después al paso más cercano del huracán por la boya, este disminuyó a un ciclón de categoría 3 (**Figura 11 d-e**), mostrando sobre su trayectoria un enfriamiento de hasta -2°C. Por tanto, a lo largo de su trayectoria se observa un enfriamiento de -4°C, notándose un enfriamiento mayor al noreste de su trayectoria.

5. Influencia de los huracanes en la profundidad de la capa de mezcla

Para analizar los cambios registrados en la profundidad de la capa de mezcla, se realizaron series de tiempo a partir del nodo más cercano a las boyas y estaciones (**Figuras 12, 14, 16 y 18**), que muestran la influencia de los huracanes Wilma, Matthew y María en un intervalo de 11 días.

Los mapas de anomalías indican las diferencias entre la MLD en los días anteriores y posteriores menos la MLD el día del paso del huracán por las boyas o estaciones (referencia). Por tanto, valores positivos indican que la MLD el día anterior y/o posterior era más profunda, en tanto que valores negativos indican que la MLD el día anterior y/o posterior era más somero que el campo de referencia. Adicionalmente, la metodología de cálculo de MLD es respecto de un valor de referencia a 10 m de profundidad, por lo cual, no es posible observar valores de MLD<10 m.

5.1 Huracán Wilma (2005)

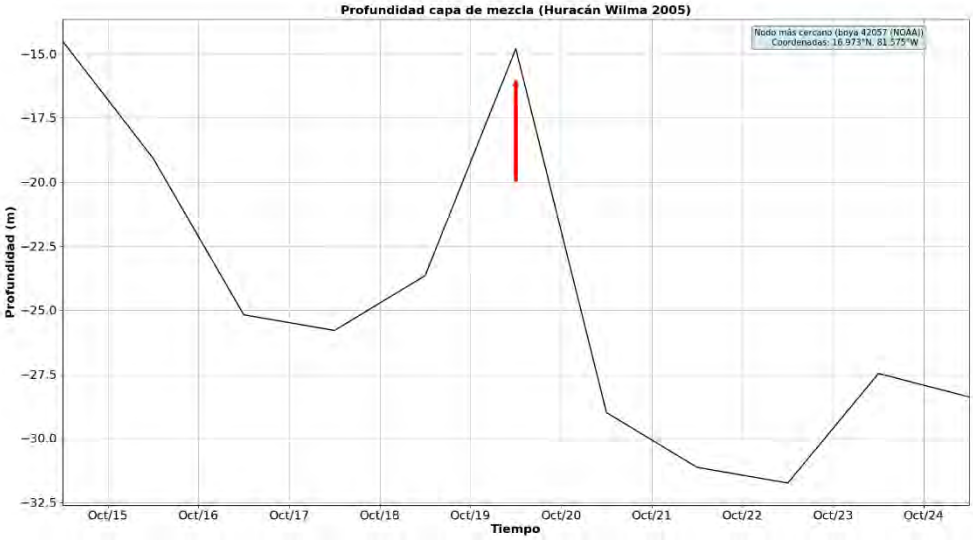

Figura 12. *Serie de tiempo profundidad de la capa de mezcla a partir de datos diarios de reanálisis tomados del nodo más cercano de la boya NOAA 42057 para octubre del 2005. La flecha roja indica paso más cercano del huracán Wilma por la boya.*

La serie de tiempo (**Figura 12**) muestra la respuesta de profundidad de la capa de mezcla provocada durante el paso del huracán Wilma (2005) como categoría 5 por el nodo más cercano a la boya NOAA 42057. Para los días entre 14 y 17 de octubre (días previos al paso del huracán) se evidencia una tendencia de hundimiento de la capa de mezcla, variando entre -15 m y -26 m. Mientras que, los días entre 17 y 18 de octubre (días previos al paso del huracán) la capa de mezcla muestra una tendencia de asomeramiento. El paso de Wilma indica un cambio en la dinámica de la zona, ya que durante su paso próximo se observa una reducción (asomeramiento) de ~11 m en la profundidad de la capa de mezcla, variando de -26 m a -15 m entre el 17 y 19 de octubre. Este comportamiento es congruente con la succión de Ekman por efecto de los vientos ciclónicos asociados al huracán, así como con el enfriamiento provocado sobre la capa superficial descrito en la sección 4. Finalmente, para los días posteriores a la incidencia del huracán, la serie de tiempo muestra un comportamiento de hundimiento de la capa de mezcla, llegando a tomar un valor final de -27.6 m el 24 de octubre.

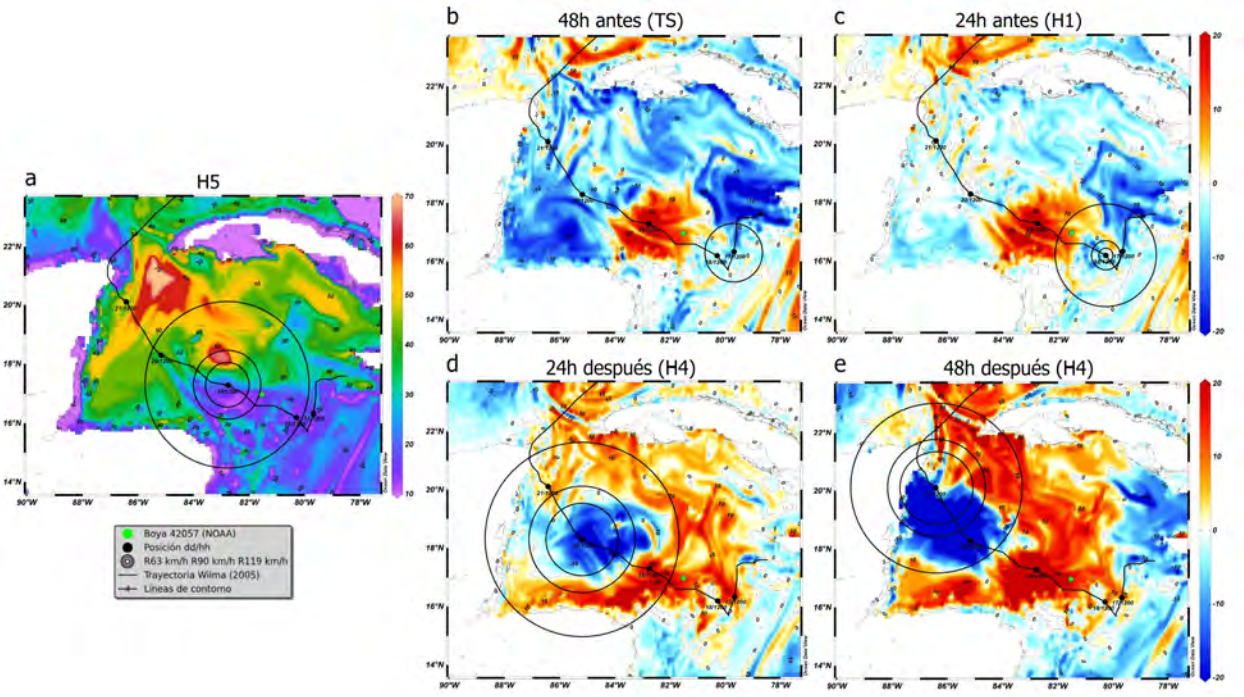

Figura 13. (a) *Campo de profundidad de la capa de mezcla (MLD) el 19 de octubre del 2005 (1200 UTC), al paso más cercano del huracán Wilma por la boya 42057 (punto verde). Anomalías de MLD en m con respecto a los valores de* ***(a)****, para las 48 y 24 horas anteriores* ***(b-c)*** *y posteriores* ***(d-e)*** *al paso más cercano del huracán por la boya. En el título de cada panel se indica la categoría del huracán a las 1200 UTC del día correspondiente. En todas las figuras se muestra la posición del centro del huracán cada 24 horas (1200 UTC), así como los radios de vientos sostenidos de 63 km* h^{-1} *(circulo más externo), 90 km* h^{-1} *y 119 km* h^{-1}*.*

La **Figura 13a** muestra la profundidad de la capa de mezcla para el día del paso más próximo del huracán Wilma por la boya NOAA 42057, con valores entre 10 y más de 70 m (Mar Caimán). En la ubicación de la boya, la MLD era de aproximadamente 15 m de profundidad, alcanzando su menor valor. En los dos días previos y los dos días posteriores del paso del huracán cerca de la boya, la MLD es aproximadamente 10 m más profunda que el 19 de octubre, mostrando que el efecto de asomeramiento de la MLD tiene un corto tiempo de duración. Por esta razón, en los días posteriores se ven anomalías negativas alrededor de la ubicación del centro del huracán, lo que indica un asomeramiento de hasta más de 20 m, con respecto de los valores mostrados en la **Figura 13a**.

En áreas donde en la fecha de referencia la MLD era más profunda (este de la Península de Yucatán), se observan anomalías de hasta -10 m de profundidad (MLD más somera) dos y un día antes de la fecha de referencia, y más de 20 metros más profunda uno y dos días después de la fecha de referencia (valores positivos sobre el canal de Yucatán). De manera que, el

asomeramiento de la MLD a causa de la succión de Ekman asociada al paso del huracán, es más clara al este de Belice y Guatemala (más de 20 m de diferencia, respecto al día de referencia), debido a que la MLD en estas zonas es entre 40 m y 50 m más profunda, mientras que no es tan clara para el resto de zonas. Es importante tener en cuenta que, por la metodología usada, si la MLD tiene un valor de 10 m, esta no puede registrar un asomeramiento.

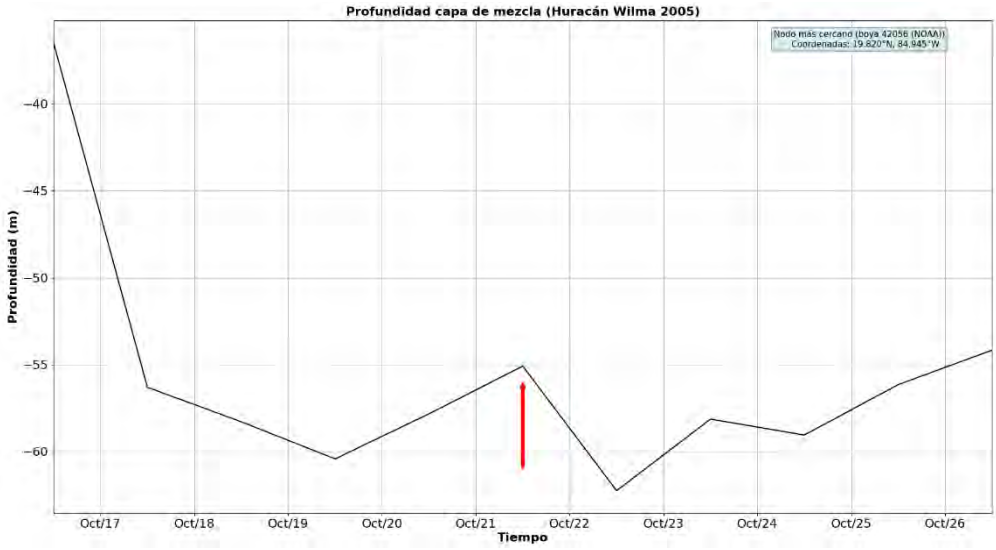

Figura 14. *Serie de tiempo profundidad de la capa de mezcla a partir de datos diarios de reanálisis tomados del nodo más cercano de la boya NOAA 42056 para octubre del 2005. La flecha roja indica paso más cercano del huracán Wilma por la boya.*

Continuando con el análisis del huracán Wilma (2005), la serie de tiempo (**Figura 14**) muestra el comportamiento de profundidad de la capa de mezcla durante el paso del huracán como categoría 4 por el nodo más cercano a la boya NOAA 42056. Para los días entre 16 y 19 de octubre (días previos al paso del huracán) se observa una tendencia de profundización de la capa de mezcla, variando entre -37 m y -61 m. A partir de esa fecha, con el paso de Wilma se evidencia un cambio en la dinámica de la zona, ya que se observa una reducción (asomeramiento) de ~6 m en la profundidad de la capa de mezcla, variando de -61 m a -55 m entre el 19 y 21 de octubre. Este comportamiento es apropiado con la succión de Ekman por efecto de los vientos ciclónicos del huracán, junto con el enfriamiento de la capa superficial. Finalmente, para los días posteriores a la incidencia del huracán la capa de mezcla tiende a disminuir su profundidad (asomeramiento) tomando valores mayores (-54 m el 26 de octubre) a los registrados durante la incidencia del huracán.

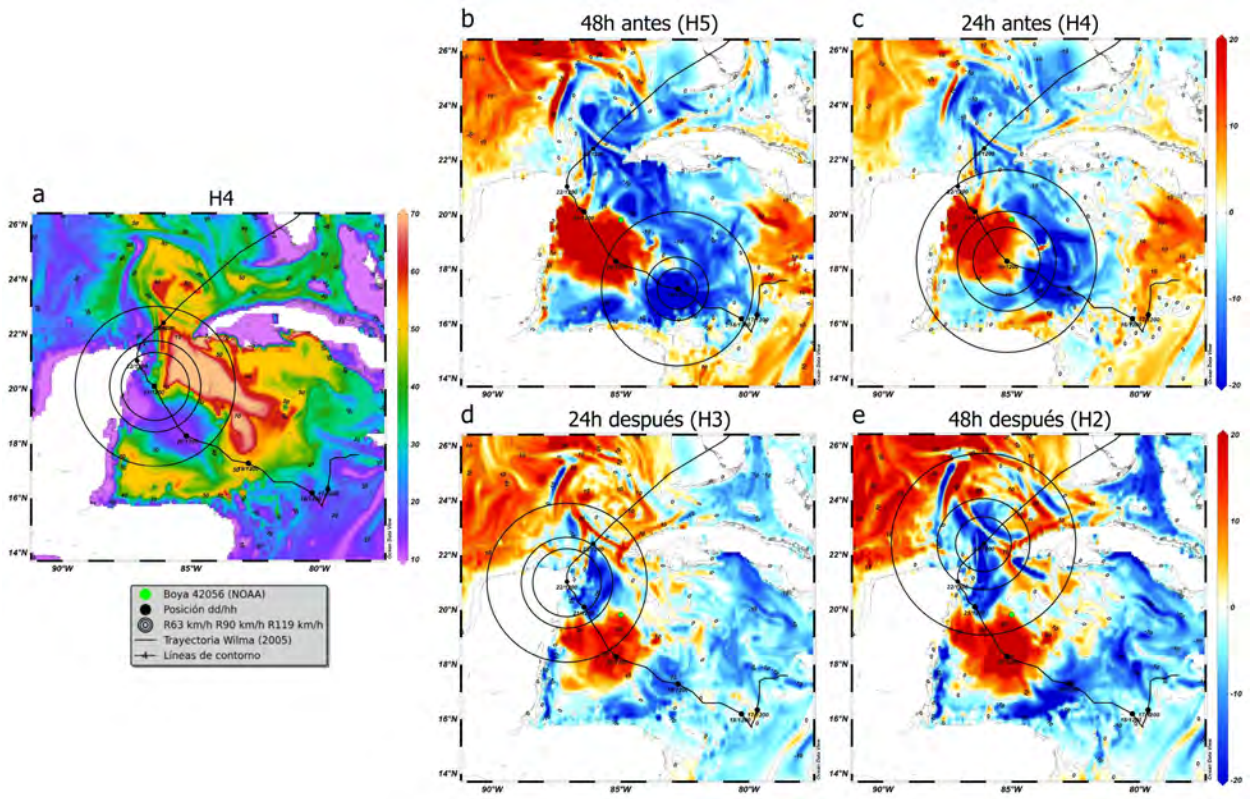

Figura 15. (a) *Campo de profundidad de la capa de mezcla (MLD) el 21 de octubre del 2005 (1200 UTC), al paso más cercano del huracán Wilma por la boya 42056 (punto verde). Anomalías de MLD en m con respecto a los valores de* ***(a)****, para las 48 y 24 horas anteriores* ***(b-c)*** *y posteriores* ***(d-e)*** *al paso más cercano del huracán por la boya. En el título de cada panel se indica la categoría del huracán a las 1200 UTC del día correspondiente. En todas las figuras se muestra la posición del centro del huracán cada 24 horas (1200 UTC), así como los radios de vientos sostenidos de 63 km h^{-1} (circulo más externo), 90 km h^{-1} y 119 km h^{-1}.*

La **Figura 15** muestra el paso próximo del huracán Wilma por la boya NOAA 42056 (**15a**), en donde la MLD era de aproximadamente 50 m de profundidad. Ahora bien, en áreas donde en la fecha de referencia la MLD era más profunda (suroeste de Cuba y el Canal de Yucatán), se observan anomalías de hasta -20 m de profundidad (MLD más somera en los días previos) dos y un día antes de la fecha de referencia, y entre -20 m y 10 m uno y dos días después de la fecha de referencia (valores tanto positivos como negativos al suroeste de Cuba y sobre el Canal de Yucatán). Por tanto, no es claro el efecto de la succión de Ekman en la MLD. Sin embargo, se logra observar en la mayoría de los días previos y posteriores, que justo donde los vientos del huracán son más intensos, las anomalías son negativas, indicando un asomeramiento de la capa de mezcla con respecto de los valores del 21 de octubre.

5.2 Huracán Matthew (2016)

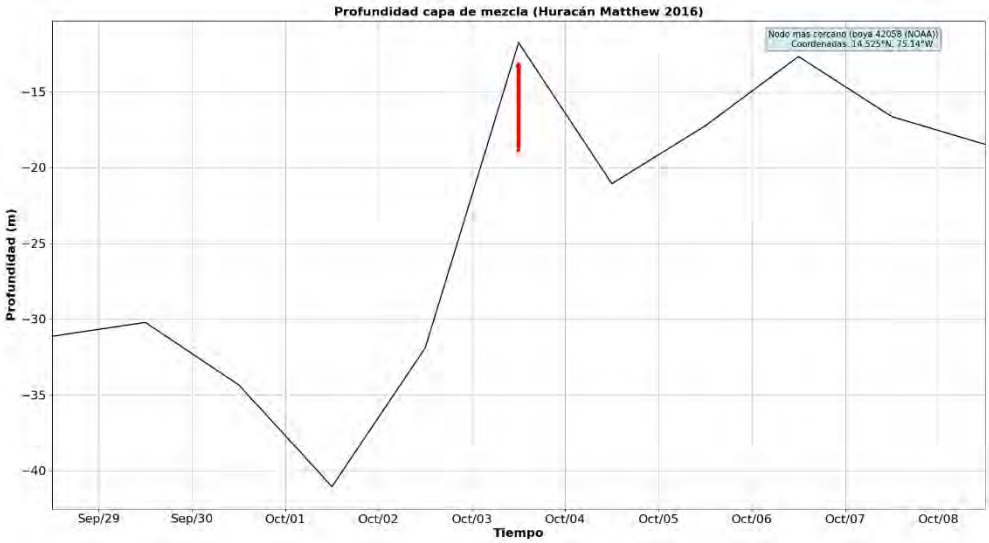

Figura 16. *Serie de tiempo profundidad de la capa de mezcla a partir de datos diarios de reanálisis tomados del nodo más cercano de la boya NOAA 42058 para octubre del 2016. La flecha roja indica paso más cercano del huracán Matthew por la boya.*

En la **Figura 16** se observa la serie de tiempo del huracán Matthew (2016), la cual muestra el comportamiento de profundidad de capa de mezcla antes, durante y después del paso del huracán como categoría 4 por el nodo más cercano a la boya NOAA 42058. Para los días previos al paso del huracán, entre 28 de septiembre y 1 de octubre se observa una tendencia de profundización de la capa de mezcla, variando entre -30 m y -41 m. A partir del 1 de octubre se puede observar un asomeramiento de la capa de mezcla durante el paso de Matthew, con una reducción de ~29 m en la MLD, variando de -41 m a -12 m entre el 1 y 3 de octubre. Este comportamiento es acorde con la succión de Ekman por efecto de los vientos ciclónicos provocados por el huracán, así como con el enfriamiento sobre la capa superficial de 3.6°C. Finalmente, para los días posteriores a la incidencia del huracán, la serie de tiempo muestra un comportamiento dinámico de hundimiento y asomeramiento de la capa de mezcla, tomando un valor final de -18 m el 8 de octubre.

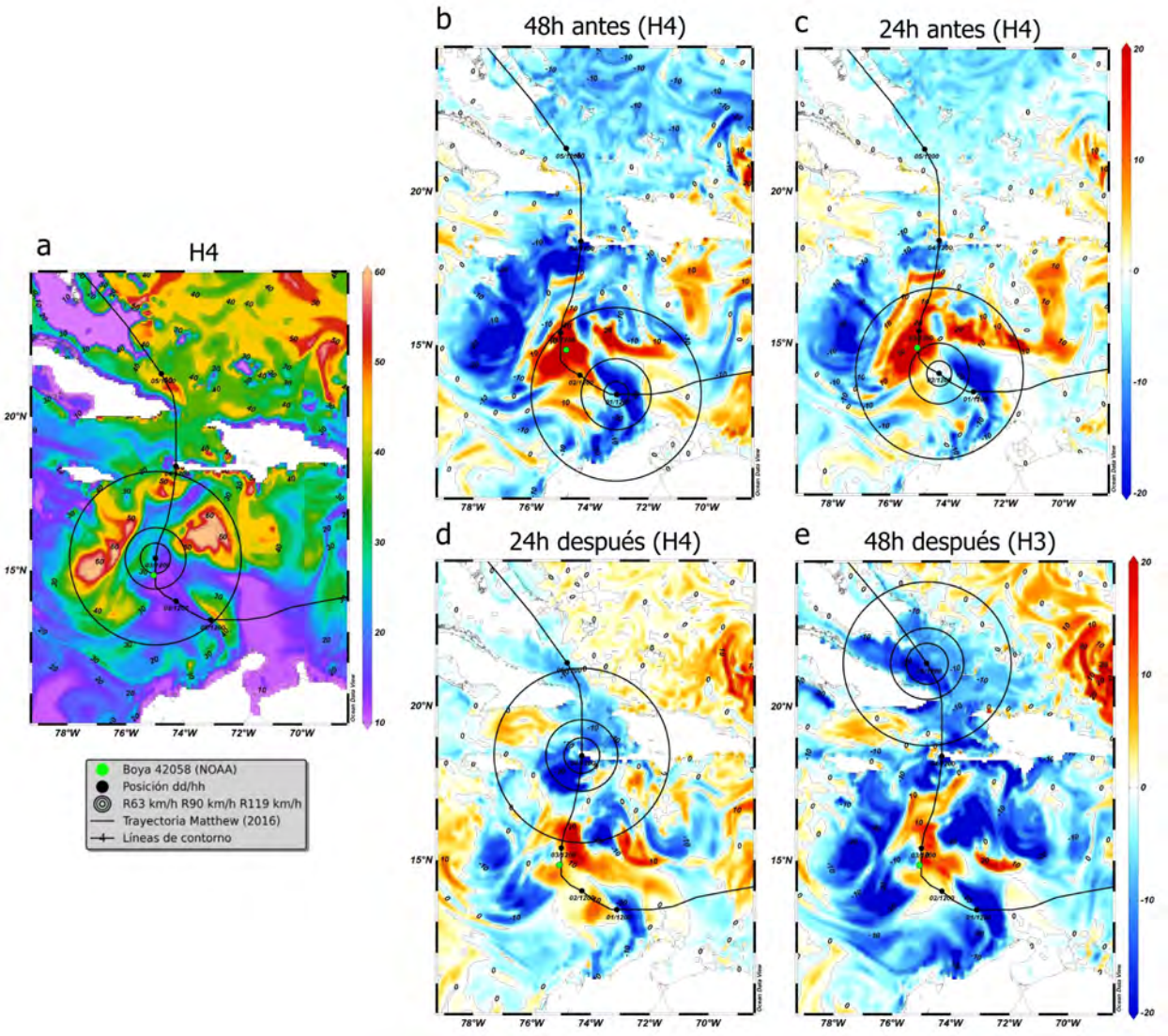

Figura 17. (a) *Campo de profundidad de la capa de mezcla (MLD) el 3 de octubre del 2016 (1200 UTC), al paso más cercano del huracán Matthew por la boya 42058 (punto verde). Anomalías de MLD en m con respecto a los valores de* ***(a)****, para las 48 y 24 horas anteriores* ***(b-c)*** *y posteriores* ***(d-e)*** *al paso más cercano del huracán por la boya. En el título de cada panel se indica la categoría del huracán a las 1200 UTC del día correspondiente. En todas las figuras se muestra la posición del centro del huracán cada 24 horas (1200 UTC), así como los radios de vientos sostenidos de 63 km* h^{-1} *(circulo más externo), 90 km* h^{-1} *y 119 km* h^{-1}*.*

El campo de profundidad de la capa de mezcla (**Figura 17)** muestra el paso próximo del huracán Matthew por la boya NOAA 42058 (**17a**), en donde la MLD era cercana a los 15 m de profundidad. Sobre la trayectoria del huracán se observa un asomeramiento de la MLD en comparación con los días anteriores (anomalías positivas en la boya). Al igual que con Wilma, se logra observar en la mayoría de los días previos y posteriores, anomalías negativas de la

MLD donde los vientos del huracán son más intensos, indicando un asomeramiento de la capa de mezcla con respecto de los valores del 3 de octubre (efecto local y de corta duración).

5.3 Huracán María (2017)

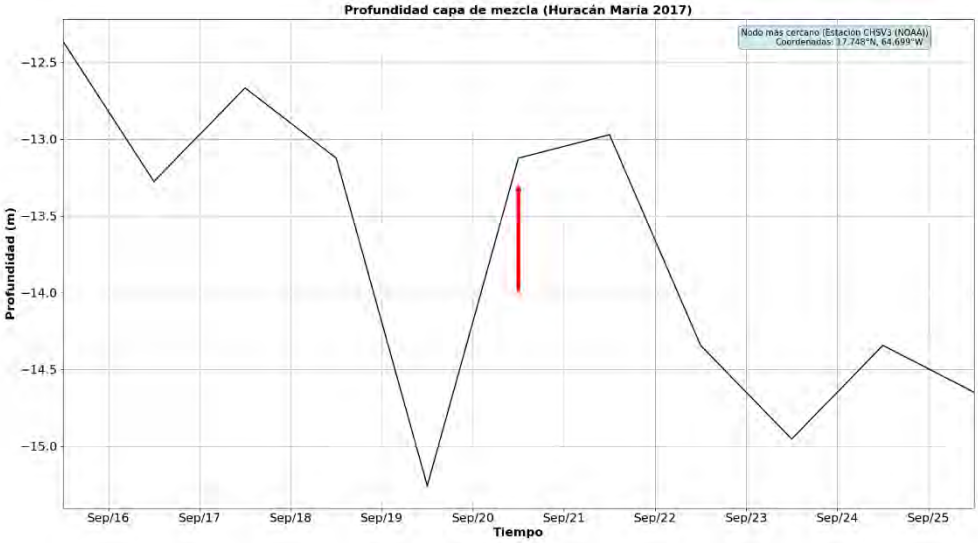

Figura 18. *Serie de tiempo profundidad de capa de mezcla a partir de datos diarios de reanálisis tomados del nodo más cercano de la estación NOAA CHSV3 para septiembre del 2017. La flecha roja indica paso más cercano del huracán María por la boya.*

La serie de tiempo **(Figura 18)** muestra el comportamiento de profundidad de la capa de mezcla para los días anteriores y posteriores al paso del huracán María (2017) como categoría 4 por el nodo más cercano a la estación NOAA CHSV3. Para los días entre 14 y 19 de septiembre (días anteriores al paso del huracán) se observa una tendencia de profundización de la capa de mezcla, variando entre -12.3 m y -15.3 m. Por tanto, el paso de María permite interpretar un cambio en la dinámica de la zona, ya que durante la incidencia se observa una reducción (asomeramiento) de ~2.2 m en la profundidad de la capa de mezcla, variando de -15.3 m a -13.1 m entre el 19 y 20 de septiembre. Este comportamiento es coherente con la succión de Ekman por efecto de los vientos ciclónicos asociados al huracán, así como con el enfriamiento de la capa superficial. Finalmente, para los días posteriores a la incidencia del huracán, la capa de mezcla nuevamente tiende a profundizarse tomando un valor final de -14.7 m el 25 de septiembre.

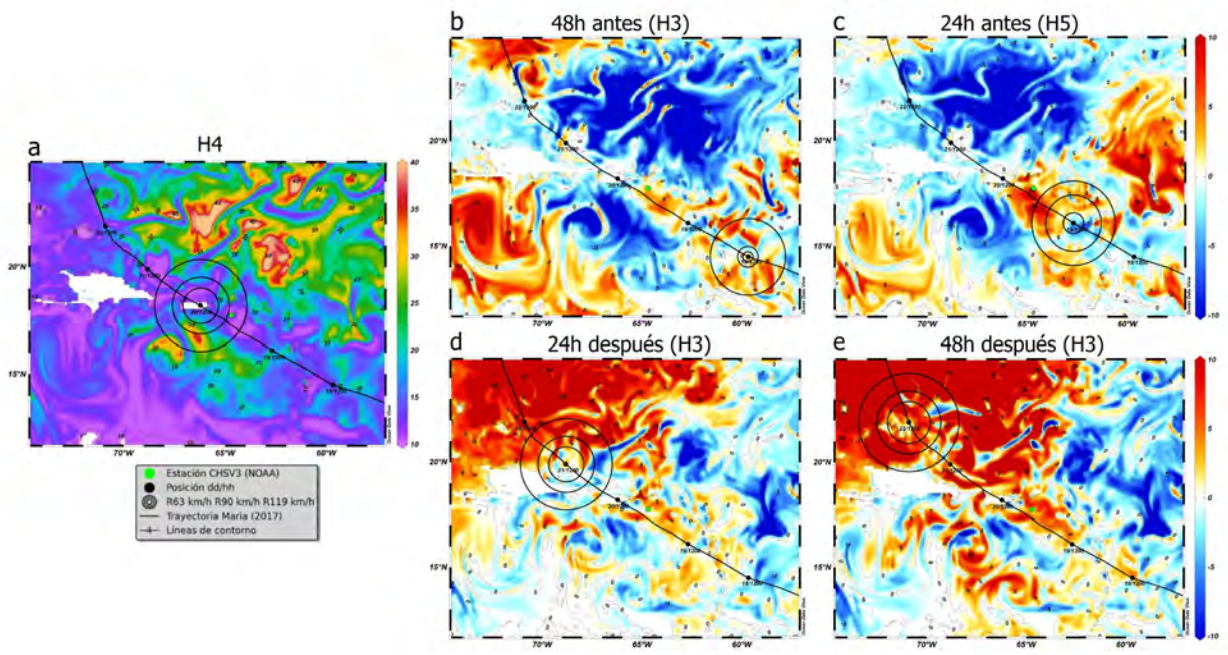

Figura 19. (a) *Campo de profundidad de la capa de mezcla (MLD) el 20 de septiembre del 2017 (1200 UTC), al paso más cercano del huracán María por la estación CHSV3 (punto verde). Anomalías de MLD en m con respecto a los valores de* ***(a)****, para las 48 y 24 horas anteriores* ***(b-c)*** *y posteriores* ***(d-e)*** *al paso más cercano del huracán por la estación. En el título de cada panel se indica la categoría del huracán a las 1200 UTC del día correspondiente. En todas las figuras se muestra la posición del centro del huracán cada 24 horas (1200 UTC), así como los radios de vientos sostenidos de 63 km* h^{-1} *(circulo más externo), 90 km* h^{-1} *y 119 km* h^{-1}*.*

El campo de profundidad de la **Figura 19** muestra el paso próximo del huracán María por la estación NOAA CHSV3 **(19a)**, en donde la MLD era muy cercana a los 10 m de profundidad, por lo cual no se observa un intenso asomeramiento de la MLD sobre la trayectoria del huracán. Sin embargo, en lugares donde en la fecha de referencia la MLD era más profunda (sur de Puerto Rico y al norte del área de estudio), se observan anomalías de -10 m de profundidad (MLD más somera) dos y un día antes de la fecha de referencia, y más de 10 metros más profunda uno y dos días después de la fecha de referencia (valores positivos al norte de La Española). El asomeramiento de la MLD no es muy evidente durante la trayectoria del huracán, por estar más cerca de su valor límite de 10 m de profundidad. Sin embargo, al sureste de la trayectoria el asomeramiento de la MLD a causa de la succión de Ekman provocada por el paso del huracán, es más evidente que al noroeste.

6. Análisis de resultados

Las respuestas físicas (y por tanto biológicas) al paso de un huracán van a depender de varios aspectos, en los que se destaca la velocidad de desplazamiento, intensidad y condiciones en la parte subsuperficial del océano (Zheng et al., 2008). En este estudio se analizó la respuesta de la capa superior del océano a tres huracanes, solamente analizando la trayectoria e intensidad del viento del huracán y su respuesta en la temperatura superficial de mar y MLD.

Varios estudios (Peña Kalil, 2023; Zedler et al., 2002) han analizado los procesos de mezcla turbulenta y enfriamiento de la capa superficial del océano antes, durante y después del paso de los ciclones tropicales. Permitiendo clasificar la respuesta de los huracanes en 2 etapas (relajamiento y forzamiento) (Koohestani et al., 2021). La etapa forzante se presenta durante la incidencia del huracán, dando paso al enfriamiento de la superficie durante la trayectoria del huracán como consecuencia del asomeramiento de la capa de mezcla (Jacob, S.D., 2003). A su vez, la etapa de relajamiento inicia después de la disipación de vientos ciclónicos, provocando que los sistemas océano-atmósfera vuelvan a condiciones normales, y que los procesos generados tiendan a disiparse (Yue et al.; 2018; Koohestani et al., 2018).

Los huracanes con mayor enfriamiento fueron Matthew y María (**Figura 8 y 10**), ambos con cambios mayores a 3°C. A diferencia de Wilma, en donde se observaron diferentes respuestas en la temperatura de la capa superficial del mar con enfriamientos de 0.8°C (**Figura 4**) y 1.7°C (**Figura 6**), respectivamente. Estas respuestas son causadas por el efecto directo de los intensos vientos del huracán sobre la boya durante la etapa forzante (Yue et al.; 2018; Koohestani et al., 2018). En este contexto, durante el paso de Wilma, la boya 42057 se encontraba influenciada por radios de vientos cercanos a los 90 km h^{-1}, a diferencia de la boya 42056, la cual se encontraba más próxima al centro del huracán, siendo influenciada por vientos mayores a 119 km h^{-1}. Como resultado, se observa un menor enfriamiento sobre la boya 42057 (0.8°C), a pesar de ser Wilma un huracán de máxima categoría en ese instante. En los casos estudiados de Matthew y María, dónde se presentó el mayor enfriamiento superficial, los vientos incidentes eran mayores a 119 km h^{-1}. Por tanto, se observa una relación directa entre la intensidad del viento y el enfriamiento superficial.

Por lo general, los huracanes más intensos y de menor velocidad de desplazamiento tienen una respuesta más fuerte sobre la superficie del océano (Chacko, 2019). Durante el paso de Wilma (**Figura 5**) y Matthew (**Figura 9**), se identifica dicha respuesta, ya que al sureste de

sus trayectorias la velocidad de desplazamiento fue menor (distancia entre la posición diaria del centro del huracán) y alcanzaron la máxima categoría para los días previos al paso por la boya, fortaleciendo la succión de Ekman forzada por el huracán. A diferencia del noroeste de sus trayectorias, en donde el enfriamiento sobre la capa superficial fue menor, posiblemente relacionado con la menor intensidad del huracán y mayor velocidad de desplazamiento.

Una respuesta notable de la capa superficial del mar a un huracán es el patrón espacial asimétrico de mezcla y enfriamiento de la superficie sobre los lados derecho e izquierdo de un huracán. En el hemisferio norte, el mayor enfriamiento de la temperatura en la superficie se produce en el lado frontal derecho del huracán, producto de la resonancia del vector del viento con las corrientes inerciales (Guan et al., 2017). Esto se evidenció en los días posteriores al paso próximo del huracán María (**Figura 11**), en donde el enfriamiento de la capa superficial del mar fue mayor en el Atlántico Norte (a la derecha de su trayectoria) que en el Mar Caribe.

Por otro lado, la respuesta más fuerte sobre la MLD se observó durante el paso del huracán Matthew (**Figura 17**), con valores de asomeramiento de ~29 m, y un enfriamiento de la superficie de 3.6°C. Por el contrario, el huracán María mostró una leve incidencia sobre la MLD, siendo más débil en comparación con Matthew y Wilma, con un asomeramiento de tan solo ~2.2 m, en tanto que el enfriamiento superficial fue mayor (~3.7°C). Lo anterior podría relacionarse con la MLD durante el día de referencia (**Figura 19a**), la cual se encontraba muy cerca de su valor límite de 10 m de profundidad, provocando que durante el paso del huracán no se observe un intenso asomeramiento sobre el área de influencia. El asomeramiento de la MLD provocado por los huracanes es lo que permite el ascenso de agua fría bajo la termoclina hacia la capa superficial del Mar Caribe. Al no observarse una relación directa entre el asomeramiento de la MLD y el enfriamiento superficial en todos los huracanes, se deben explorar las causas. Esto podría relacionarse con la interacción entre los ciclones tropicales y la capa barrera, lo que sugiere que capas más delgadas y débiles son más favorables al enfriamiento y, por tanto, a disminuir la intensidad de los ciclones (Grodsky et al., 2012; Balaguru et al., 2012). Por el contrario, la presencia de una capa barrera fuerte va a suprimir la mezcla vertical, impidiendo el paso de agua más fría y profunda que se desplaza hacia la superficie, facilitando la intensificación de los huracanes (Sprintall & Tomczak, 1992; Balaguru et al., 2012; Price, 1981).

Además, los días anteriores y posteriores presentaron cambios no homogéneos de MLD en diferentes áreas. Llama la atención la respuesta provocada por el huracán María en el Atlántico Norte (**Figura 19**), ya que se observa un intenso hundimiento de la capa de mezcla, a diferencia de Matthew (**Figura 17**) en donde se observa un asomeramiento posterior a su paso más cercano por la boya oceanográfica. Esto puede ser una respuesta física real, como también causada por limitaciones de los datos de reanálisis empleados para estudiar el comportamiento de la capa de mezcla, ya que finalmente no son observaciones directas como sí lo son los datos de temperatura superficial de las boyas.

Tanto Dean 2005 (Peña Kalil, 2023), como Wilma, Matthew y María tuvieron un impacto en la regulación termodinámica de la columna de agua en el Mar Caribe, provocando una redistribución de calor a lo largo de su paso, en la que se destacan respuestas más fuertes provocadas por Matthew y María respecto a Dean (2005), el cual causó un enfriamiento de 0.7°C. Cabe aclarar que los efectos provocados por los huracanes sobre la capa superficial del mar predominan durante la etapa de relajamiento tanto para la temperatura superficial del mar como para la profundidad de la capa de mezcla, la presencia de los huracanes dio paso a procesos de surgencia que generaron enfriamientos mayores a 3°C sobre la capa superficial del océano. Tanto Dean (2005) como María generaron procesos resonantes, el cual provoco un mayor enfriamiento en el lado frontal derecho del huracán con respecto al día de referencia.

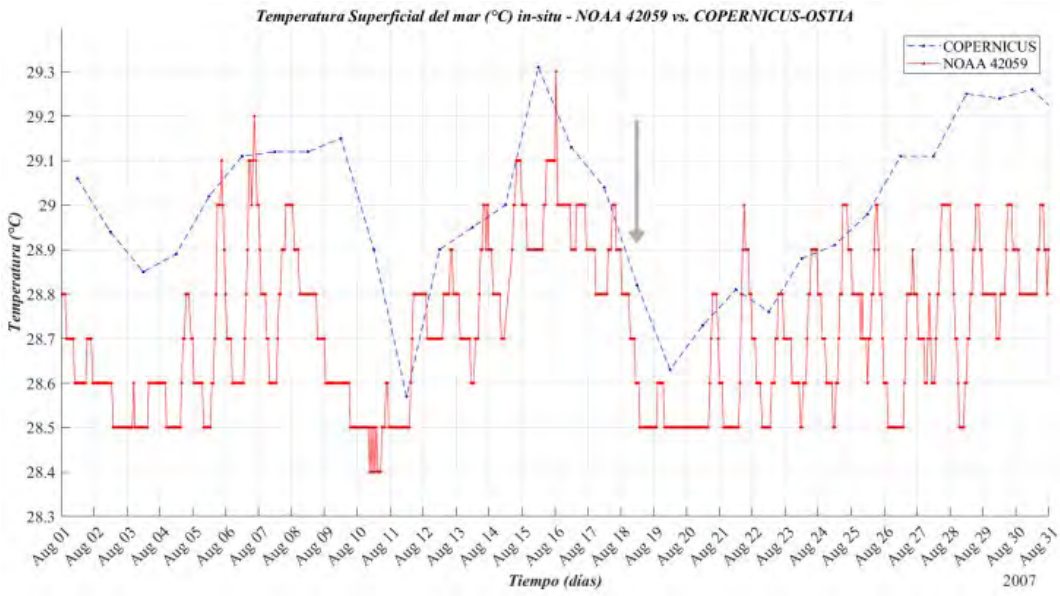

Figura 20. *Serie de tiempo de datos in-situ (cada 60 minutos) de temperatura en la capa superficial del mar obtenidos por la boya NOAA 42059. La flecha gris indica el paso más cercano al centro del huracán Dean por la boya. Tomado de Peña Kalil (2023).*

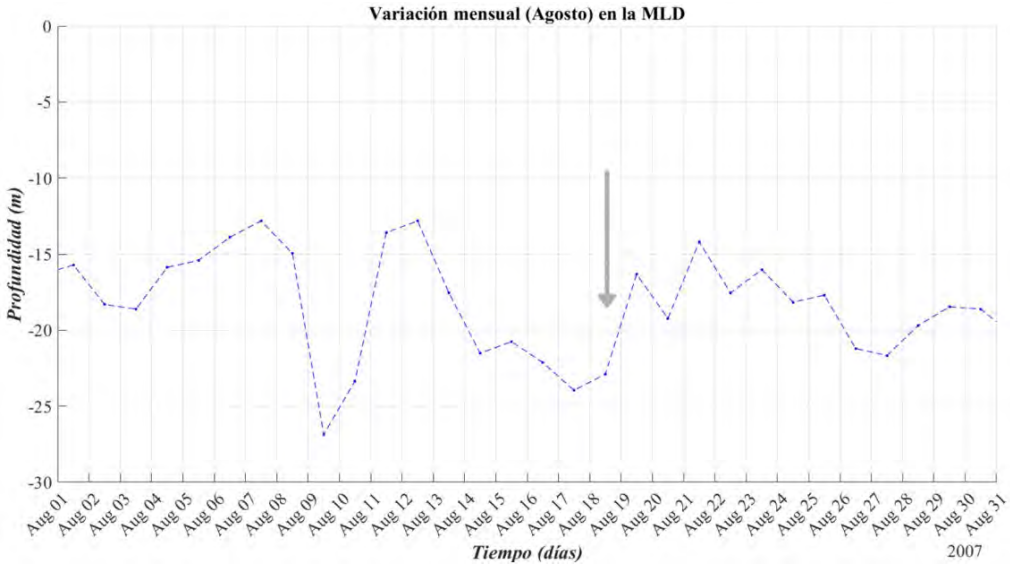

Figura 21. *Serie de tiempo Profundidad de la Capa de Mezcla a partir de datos diarios de reanálisis tomados del nodo más cercano de la boya NOAA 42059 para agosto del 2007. La flecha gris indica paso más cercano del huracán Dean por la boya. Tomado de Peña Kalil (2023).*

Además, los efectos registrados por la boya NOAA 42059 (**Figura 20 y 21**) (~0.7°C para la TSM y ~8 m para la MLD) durante la incidencia de Dean (2005), se relacionan con los obtenidos por la boya NOAA 42057 durante la incidencia de Wilma. Destacando que tanto Wilma como Dean incidieron sobre la boya como huracanes de máxima categoría, pero su respuesta tanto en TSM como en MLD fue bastante débil en comparación con Matthew y María, en donde se obtuvieron respuestas mayores a 3°C. Asimismo, Peña Kalil (2023) argumenta que la débil respuesta está asociada a limitaciones de las condiciones oceánicas y velocidad translacional del huracán, dado que durante la incidencia de Dean (2005) este se clasificaba como un sistema ciclónico rápido, provocando que su paso sea más rápido y limitando los efectos sobre la capa superficial del Mar Caribe. Adicionalmente, se destaca que la fuerte estabilidad estática en el Mar Caribe (Torres Parra et al., 2023), aumentará la resistencia a procesos de mezcla vertical, disminuyendo el efecto de los huracanes sobre la columna de agua.

7. Conclusiones

Los huracanes de máxima categoría Wilma, Matthew y María tuvieron una incidencia sobre la capa superior en el Mar Caribe, destacando las respuestas heterogéneas provocadas por cada huracán a lo largo de su trayectoria. Además, se evidenció una relación entre la intensidad de los vientos y el enfriamiento sobre la capa superficial para los huracanes María y Matthew, que provocaron enfriamientos mayores a 3°C en la TSM. A diferencia de Wilma, donde se observaron respuestas por debajo del rango esperado para un huracán de categoría 5, probablemente por la incidencia de radios de vientos > 90 km h^{-1} y > 64 km h^{-1} (vientos equivalentes a una tormenta tropical) sobre la boya oceanográfica.

En cuanto a la MLD, se determinó que Matthew y Wilma tuvieron valores de asomeramiento mayores con respecto de María, contrastando con los valores de TSM, en donde María tuvo el mayor enfriamiento (~3.7°C). Se consideró que la débil respuesta provocada por el paso de María, se debe a que la capa de mezcla se encontraba cerca de su valor límite (10 m), condicionando los procesos de asomeramiento a su paso. También se sugiere tener en cuenta en el efecto de asomeramiento, la velocidad de desplazamiento de los huracanes.

En conclusión, este trabajo de grado proporciona información sobre los procesos de interacción entre los huracanes y la capa superior del océano. En particular, los resultados analizados ayudan a entender un poco mejor la respuesta de la capa superior del Mar Caribe al paso de los huracanes Wilma, Matthew y María.

8. Recomendaciones

Teniendo en cuenta que, el ascenso de agua fría bajo la termoclina hacia la capa superficial es provocado por el asomeramiento de la MLD durante la incidencia de los huracanes, se considera importante investigar a fondo las causas que provocaron la pobre relación entre los cambios de la TSM y MLD durante la influencia del huracán María a lo largo de su trayectoria. Para esto, se recomienda continuar con estudios que permita analizar el efecto de la capa barrera en la respuesta superficial del océano ante el paso de los huracanes Wilma, Matthew y María, ya que la presencia y características de esta regula el ascenso de aguas de la termoclina hacia la superficie, que producen un enfriamiento de la capa superficial del mar y, por tanto, afectan la intensidad de los huracanes (e.g Balaguru et al., 2012).

Además, se resalta la necesidad de continuar investigando estos fenómenos atmosféricos, utilizando otros modelos o bases de datos, así como datos in-situ de las boyas ARGOS, que determinen el comportamiento de la MLD durante el paso de los huracanes, con el objetivo de entender más a fondo los procesos involucrados durante la incidencia de los ciclones tropicales, así como sus efectos en la biosfera.

9. Bibliografía

Amador, J. A. (2008). The Intra-Americas Seas Low-Level Jet (IALLJ): Overview and Future Research. Annals of the New York Academy of Sciences, 1146 (1), 153-188. https://doi.org/10.1196/annals.1446.012

Andrade-Amaya, C. A. (2000). The circulation and variability of the Colombian Basin in the Caribbean Sea (Doctoral dissertation, Tesis Ph. D. University of Wales, Wales).

Balaguru, K., Chang, P., Saravanan, R., Leung, L. R., Xu, Z., Li, M., & Hsieh, J. S. (2012). Ocean barrier layers' effect on tropical cyclone intensification. Proceedings of the National Academy of Sciences, 109(36), 14343-14347. https://doi.org/10.1073/pnas.1201364109

Beesley, D., Olejarz, J., Tandon, A., & Marshall, J. (2008). A Laboratory Demonstration of Coriolis Effects on Wind-Driven Ocean Currents. In The oceanography society (Vol. 21, Issue 2). https://tos.org/oceanography/assets/docs/21-2_beesley.pdf

Bustos Usta, D.F., Torres Parra, R.R. (2021). Ocean and atmosphere changes in the Caribbean Sea during the twenty-first century using CMIP5 models. Ocean Dynamics 71, 757–777. https://doi.org/10.1007/s10236-021-01462-z

Chacko, N. (2019). Differential chlorophyll blooms induced by tropical cyclones and their relation to cyclone characteristics and ocean pre-conditions in the Indian Ocean. Journal of Earth System Science, 128(7), 177. https://doi.org/10.1007/s12040-019-1207-5

Chen, D., Busalacchi, A. J., & Rothstein, L. M. (1994). The roles of vertical mixing, solar radiation, and wind stress in a model simulation of the sea surface temperature seasonal cycle in the tropical Pacific Ocean. Journal Of Geophysical Research, 99(C10), 20345-20359. https://doi.org/10.1029/94jc01621

Copernicus Marine Service. (2021). Global Ocean OSTIA Sea Surface Temperature and Sea Ice Reprocessed. Recuperado de: https://doi.org/10.48670/moi-00168

Copernicus Marine Service. (2022). Global Ocean Physics Reanalysis. Recuperado de: https://doi.org/10.48670/moi-00021

de Boyer Montégut, C., G. Madec, A. S. Fischer, A. Lazar, and D. Iudicone (2004), Mixed layer depth over the global ocean: An examination of profile data and a profile-based climatology, J. Geophys. Res., 109, C12003, doi:10.1029/2004JC002378.

de Boyer Montégut, C., J. Mignot, A. Lazar, and S. Cravatte (2007), Control of salinity on the mixed layer depth in the world ocean: 1. General description, J. Geophys. Res., 112, C06011, doi:10.1029/2006JC003953.

Emanuel, K. (1987). The dependence of hurricane intensity on climate. Nature 326, 483–485. https://doi.org/10.1038/326483a0

Grodsky, S. A., N. Reul, G. Lagerloef, G. Reverdin, J. A. Carton, B. Chapron, Y. Quilfen, V. N. Kudryavtsev, and H.-Y. Kao (2012), Haline hurricane wake in the Amazon/Orinoco plume: AQUARIUS/SACD and SMOS observations, Geophys. Res. Lett., 39, L20603, doi:10.1029/2012GL053335.

Guan, S., Liu, Z., Song, J., Hou, Y., & Feng, L. (2017). Upper ocean response to Super Typhoon Tembin (2012) explored using multiplatform satellites and Argo float observations. International Journal of Remote Sensing, 38(18), 5150-5167. https://doi.org/10.1080/01431161.2017.1335911

Hastenrath, S. (1984). Interannual Variability and Annual Cycle: Mechanisms of Circulation and Climate in the Tropical Atlantic Sector. Monthly Weather Review, 112(6), 1097-1107. https://doi.org/10.1175/1520-0493(1984)112<1097:IVAACM>2.0.CO;2

IPCC (2012) Gestión de los riesgos de eventos extremos y desastres para avanzar en la adaptación al cambio climático. http://ipcc-wg2.gov/SREX/, pág. 582

Jacob, S. D., & Shay, L. K. (2003). The Role of Oceanic Mesoscale Features on the Tropical Cyclone–Induced Mixed Layer Response: A Case Study. Journal of Physical Oceanography, 33(4), 649-676. https://doi.org/10.1175/1520-0485(2003)33<649:TROOMF>2.0.CO;2

Kara, A. B., P. A. Rochford, and H. E. Hurlburt (2000), An optimal definition for ocean mixed layer depth, J. Geophys. Res., 105(C7), 16803–16821, doi:10.1029/2000JC900072.

Kerry, E. (2003). Tropical cyclones. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 31, 75–104. https://doi.org/10.1146/annurev.earth.31.100901.141259

Ke-xin, L., & Fei, Z. (2022). Effects of a freshening trend on upper-ocean stratification over the central tropical Pacific and their representation by CMIP6 models. Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography, 195, 104999.

Knapp, K. R., Diamond, H. J., Kossin, J. P., Kruk, M. C., & Schreck, C. J. (2018). International best track archive for climate stewardship (IBTrACS) project, version 4. NOAA National Centers for Environmental Information, 10.

Knutson, T., McBride, J., Chan, J. et al. (2010). Tropical cyclones and climate change. Nature Geosci 3, 157–163. https://doi.org/10.1038/ngeo779

Koohestani, K., Allahdadi, M. N., & Chaichitehrani, N. (2021). Oceanic Response to Tropical Cyclone Gonu (2007) in the Gulf of Oman and the Northern Arabian Sea: Estimating Depth of the Mixed Layer Using Satellite SST and Climatological Data. Journal of Marine Science and Engineering, 9(11), 1244.

Koohestani, K., Allahdadi, M. N., & Kamalian, U. R. (2018). Observed response to cyclone Ashobaa along coasts of Arabian Sea and Gulf of Oman. Am. J. Fluid Dyn, 8, 19-29. 10.5923/j.ajfd.20180801.03

Mann, K. H., & Lazier, J. R. (2005). Dynamics of marine ecosystems: biological-physical interactions in the oceans. John Wiley & Sons.

McGee, L., He, R. (2018). Mesoscale and submesoscale mechanisms behind asymmetric cooling and phytoplankton blooms induced by hurricanes: a comparison between an open ocean case and a continental shelf sea case. Ocean Dynamics 68, 1443–1456. https://doi.org/10.1007/s10236-018-1203-3

National data buoy center. (1996). https://www.ndbc.noaa.gov/

Ortiz Royero, J. C. (2007). Huracanes y tormentas tropicales en el mar Caribe colombiano desde 1900. Boletín Científico CIOH, 25, 54–60. https://doi.org/10.26640/01200542.25.54_60

Ortiz Royero, J. C., Cera, S. H., & Gomes, H. (2022). Coastal meteo-marine parameters of Hurricane Matthew along the Colombian Caribbean Coast: establishing a baseline of knowledge. Journal of Coastal Research, 38(1), 66-76. https://doi.org/10.2112/JCOASTRES-D-20-00108.1

Ortiz Royero, J. C., & Mercado Irrizarry, A. (2006). Estudio preliminar del impacto del oleaje de huracanes en la línea costera del Departamento del Atlántico. 10.26640/01200542.24.48_59

Pan, J., Huang, L., Devlin, A.T., Lin, H. (2018). Quantification of Typhoon-Induced Phytoplankton Blooms Using Satellite Multi-Sensor Data. Remote Sens. 10, 318. https://doi.org/10.3390/rs10020318

Park, J.-H., Pak, G., Kim, E. J., & Kang, S. K. (2021). Impact of tropical cyclones on geostrophic velocity of the western boundary current. Geophysical Research Letters, 48, e2021GL094355. https://doi.org/10.1029/2021GL094355

Pasch, J. R., Blake, E. S., Cobb, H. D., & Roberts, D. P. (2006). National hurricane center tropical cyclone report. Hurricane Wilma. Recuperado de: https://www.nhc.noaa.gov/data/tcr/AL252005_Wilma.pdf

Pasch, R. J., Penny, A. B., & Berg, R. (2023). National hurricane center tropical cyclone report. Hurricane Maria. Recuperado de: https://www.nhc.noaa.gov/data/tcr/AL152017_Maria.pdf

Peña Kalil, M. A. (2023). Efectos del huracán DEAN (2007) en la capa oceánica superior del Mar Caribe. (Trabajo de grado). Universidad del Norte.

Price, J. F. (1981). Upper ocean response to a hurricane. Journal of Physical Oceanography, 11(2), 153-175. https://doi.org/10.1175/1520-0485(1981)011<0153:UORTAH>2.0.CO;2

Ramsay, H. (2017). The Global Climatology of Tropical Cyclones. Oxford Research Encyclopedia of Natural Hazard Science. Retrieved 23 Apr. 2024, from https://oxfordre.com/naturalhazardscience/view/10.1093/acrefore/9780199389407.001.0001/acrefore-9780199389407-e-79.

Ruiz-Ochoa, M., Beier, E., Bernal, G., & Barton, E. D. (2012). Sea surface temperature variability in the Colombian Basin, Caribbean Sea. Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers, 64, 43-53. https://doi.org/10.1016/j.dsr.2012.01.013

Shultz, J. M., Cela, T., Marcelin, L. H., Espinola, M., Heitmann, I., Sanchez, C., … Rechkemmer, A. (2016). The trauma signature of 2016 Hurricane Matthew and the

psychosocial impact on Haiti. Disaster Health, 3(4), 121–138. https://doi.org/10.1080/21665044.2016.1263538

Sprigg, W. A., Bosart, L. F., & National Research Council. (1998). The meteorological buoy and coastal marine automated network for the United States. National Academies Press.

Sprintall, J., & Tomczak, M. (1992). Evidence of the barrier layer in the surface layer of the tropics. Journal of Geophysical Research: Oceans, 97(C5), 7305-7316. DOI:10.1029/92JC00407

Stewart, R. S. (2017). National hurricane center tropical cyclone report. Hurricane Matthew. Recuperado de: https://www.nhc.noaa.gov/data/tcr/AL142016_Matthew.pdf

Torres Parra, R. R., Latandret Solana, S., Salon Barros, J., & Dagua Paz, C. J. (2023). Water masses in the Caribbean Sea and sub-annual variability in the Guajira upwelling region. Ocean Dynamics, 73(2), 39–57. https://doi.org/10.1007/s10236-022-01529-5

Torres Posada, T. M. (2023). Estabilidad estática en la capa superior del Mar Caribe y Golfo de México. (Trabajo de grado). Universidad del Norte.

Valderá, F. N., González Pedroso, C., & Pérez Suárez, R. (2021). Variabilidad de la actividad ciclónica tropical en el océano Atlántico, golfo de México, mar Caribe y Cuba. Revista Cubana De Meteorología, 27(4). Recuperado a partir de http://rcm.insmet.cu/index.php/rcm/article/view/589

Waldman, R. (2018). Physical Oceanography-UNAM, Mexico Lecture 3: The Wind-Driven Oceanic Circulation.

Wang, D., & Oey, L. (2008). Hindcast of Waves and Currents in Hurricane Katrina. Bulletin of the American Meteorological Society, 89(4), 487-496. https://doi.org/10.1175/BAMS-89-4-487

Wang D, Zhao H. (2008). Estimation of Phytoplankton Responses to Hurricane Gonu over the Arabian Sea Based on Ocean Color Data. Sensors. 8(8):4878-4893. https://doi.org/10.3390/s8084878

Wang, H., Li, J., Song, J., Leng, H., Wang, H., Zhang, Z., Zhang, H., Zheng, M., Yang, X., & Wang, C. (2023). The abnormal track of super typhoon Hinnamnor (2022) and its

interaction with the upper ocean. Deep-Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers, 201. https://doi.org/10.1016/j.dsr.2023.104160

Webb, P. (2019). Introduction to Oceanography. http://rwu.pressbooks.pub/webboceanography

Yue, X., Zhang, B., Liu, G., Li, X., Zhang, H., & He, Y. (2018). Upper ocean response to typhoon Kalmaegi and Sarika in the South China Sea from multiple-satellite observations and numerical simulations. Remote sensing, 10(2), 348. https://doi.org/10.3390/rs10020348

Zedler, S. E., Dickey, T. D., Doney, S. C., Price, J. F., Yu, X., & Mellor, G. L. (2002). Analyses and simulations of the upper ocean's response to Hurricane Felix at the Bermuda Testbed Mooring site: 13–23 August 1995. Journal of Geophysical Research: Oceans, 107(C12), 25-1. https://doi.org/10.1029/2001JC000969

Zheng, Z. W., Ho, C. R., & Kuo, N. J. (2008). Importance of pre-existing oceanic conditions to upper ocean response induced by Super Typhoon Hai-Tang. Geophysical Research Letters, 35(20). https://doi.org/10.1029/2008GL035524