

EVOLUCIÓN DEL CALENTAMIENTO EN LA TRANSICIÓN TROPICAL DEL HURACAN OPHELIA

Carlos CALVO-SANCHO¹, Richard ROTUNNO², Ana MONTORO-MENDOZA^{1,3}, Juan Jesús GONZÁLEZ-ALEMÁN⁴, Mauricio LÓPEZ-REYES^{5,6} y María Luisa MARTÍN¹

¹ *Departamento de Matemática Aplicada, Escuela de Ingeniería Informática, Universidad de Valladolid, Segovia.*

² *National Center for Atmospheric Research (NCAR), Boulder, Colorado, US.*

³ *Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC). Instituto de Geociencias (IGEO), Madrid, España.*

⁴ *Departamento de Desarrollo y Aplicaciones, Agencia Estatal de Meteorología (AEMET), Madrid, España.*

⁵ *Instituto de Astronomía y Meteorología (IAM), Departamento de Física, Universidad de Guadalajara, México.*

⁶ *Departamento de Física de la Tierra y Astrofísica, Universidad Complutense de Madrid, España.*

carlos.calvo.sancho@uva.es

RESUMEN

Los ciclones con características tropicales presentan una gran amenaza para la sociedad europea debido a los impactos asociados. En la última década, se ha observado un incremento de este tipo de ciclones anómalos, la mayoría originándose a partir de una transición tropical (TT) proceso por el cual un ciclón baroclino se transforma en un ciclón barotrópico. Un ejemplo es el Huracán Ophelia en 2017, el ciclón tropical más intenso (categoría 3), cuya ciclogénesis tropical fue una TT. En este trabajo se estudia la evolución del calentamiento del centro del sistema, como efecto generador de procesos mesoescalares en la última etapa de la TT de Ophelia. Este trabajo profundiza en el conocimiento de la evolución del calentamiento del centro de un sistema que está experimentando un proceso de transición tropical. Se ha simulado el Huracán Ophelia con el modelo WRF-ARW con resolución horizontal de 1 km. Los resultados muestran que el sistema tiene tres fases diferenciadas en función de su naturaleza térmica: 1) fase de naturaleza fría baroclina del ciclón; 2) fase de comienzo del proceso de transición tropical, donde el sistema comparte características baroclinas y barotrópicas; 3) fase de calentamiento continuo en la última etapa de la transición tropical y primera intensificación del ciclón tropical, asociado a la actividad convectiva.

Palabras clave: Transiciones Tropicales, Ciclón Tropical, Huracán, Procesos Mesoescalares.

ABSTRACT

Cyclones with tropical characteristics pose a major threat to European society due to the associated impacts. An increase in this type of anomalous cyclone has been observed over the last decade, most of them resulting from a tropical transition (TT) process, in which a baroclinic cyclone transforms into a barotropic cyclone. An example is Hurricane Ophelia in 2017, the most intense tropical cyclone (CAT3) whose tropical cyclogenesis was a TT. In this work, we study the evolution of the heating of the center of the system as a generating effect of mesoscale processes in the final stage of Ophelia's TT.

This work deepens the knowledge of the evolution of the heating of the center of a system undergoing a TT process. Hurricane Ophelia was simulated with the WRF-ARW model at a horizontal resolution of 1 km. The results show that the system has three distinct phases depending on its thermal nature: 1) a phase of cold baroclinic nature of the cyclone; 2) a phase at the beginning of the TT process, where the system shares baroclinic and barotropic characteristics; 3) a phase of continuous warming in the last phase of the TT and first intensification of the tropical cyclone, associated with convective activity.

Key words: Tropical Transitions, Tropical Cyclone, Hurricane, Mesoscale processes.

1. INTRODUCCIÓN

Los ciclones tropicales son ciclones de núcleo cálido puramente barotrópico y diabáticos. La gran mayoría de los casos tienen un origen barotrópico, por ejemplo, a partir de ondas del este, bajas o vaguadas tropicales (McTaggart-Cowan et al., 2013). Sin embargo, existen una serie de precursores baroclinos que favorecen la ciclogénesis tropical si las condiciones atmosféricas ambientales son apropiadas. Uno de estos posibles precursores son las transiciones tropicales (TT). La TT es una forma de ciclogénesis tropical asociada con precursores extratropicales donde un ciclón baroclino evoluciona y transiciona a un ciclón tropical cuando es afectado por una perturbación en niveles altos en latitudes medias (p.ej., Davis y Bosart 2003, 2004; Calvo-Sancho et al., 2022).

Los ciclones tropicales formados vía TTs tienen una mayor probabilidad de afectar al área occidental europea, dado que se desarrollan en latitudes subtropicales y medias. De hecho, en los últimos años se ha registrado un aumento de la amenaza de ciclones tropicales con este tipo de génesis en Europa occidental. Uno de ellos fue el Huracán Ophelia en 2017, que estuvo cerca de impactar en la península ibérica, y afectó gravemente a Irlanda (Moore, 2021) y a la comunidad autónoma de Galicia. Este tipo de ciclones tienen un impacto muy alto en la sociedad, los sistemas ecológicos y la economía, produciendo riesgos y daños generalizados. Los daños más comunes suelen estar relacionados con las infraestructuras, agricultura, turismo y pérdidas humanas (Peduzzi et al., 2012; Lenzen et al., 2019). Por lo tanto, mejorar el conocimiento de los procesos mesoescalares de estos eventos produciría un importante beneficio socioeconómico, principalmente en las regiones de la península ibérica y Europa occidental (Galarneau et al., 2015).

La presente contribución analiza la evolución del calentamiento del centro del sistema, como efecto generador de procesos mesoescalares que favorecen la TT. Para ello, se ha simulado el Huracán Ophelia a alta resolución en los instantes previos y posteriores a la TT que tuvo lugar (Fig. 2a).

2. MÉTODOS

Para la simulación de Ophelia se ha utilizado el modelo numérico de predicción meteorológica WRF-ARW versión 4.5 (Skamarock et al., 2019) utilizando el análisis del *ECMWF-IFS* como condiciones iniciales, con una resolución horizontal de 0.1° , una resolución vertical de 137 niveles híbridos y una resolución temporal de 6 h. El Huracán Ophelia se ha simulado en un período de 96 h para recoger el período previo y posterior a su TT. Asimismo, se han considerado las primeras 6 h de la simulación como *spin-up*. Se han definido dos dominios anidados utilizando 1000 x 1000 puntos de malla (Fig. 1) y 65 niveles verticales sigma. La resolución horizontal de los dominios es de 3 y 1 km, respectivamente. Las parametrizaciones físicas del modelo WRF-ARW utilizadas son las recomendadas por la guía WRF para la simulación de ciclones tropicales, así como en distintos trabajos (Quitán-Hernández et al., 2021; Calvo-Sancho et al., 2023a, b, c). Los esquemas de parametrizaciones utilizados son: el esquema de onda corta y larga *RRTM* (Mlawer et al., 1997), el modelo de superficie terrestre *Unified Noah* (Tewari et al., 2004), el modelo de capa superficial del MM5 revisado (Jiménez et al., 2012), el modelo de capa límite planetaria de *Yonsei University* (YSU; Hong et al., 2006) y el esquema de microfísica WRF Single-moment 6-class (WSM 6-class; Hong y Lim, 2006). La convección profunda es resuelta explícitamente por el modelo.

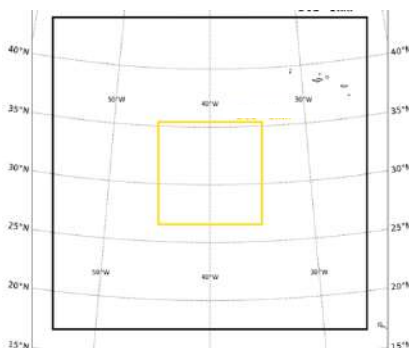


Fig. 1: Dominios anidados utilizados en el modelo WRF-ARW: D1 (D2) recuadrado en negro (amarillo).

Para el análisis del calentamiento del centro del sistema, se han seleccionado las siguientes variables: componentes del viento u y v , temperatura, temperatura potencial y temperatura potencial equivalente. Se ha hecho una transformación de estas variables de proyección cartesiana a cilíndrica $[(u, v) = (u_c \cos \phi + v_c \sin \phi, v_c \cos \phi - u_c \sin \phi)]$, siendo u_c y v_c las componentes del viento en

proyección cartesiana, u y v las componentes del viento en proyección cilíndrica (o velocidad radial y tangencial, respectivamente), y ϕ el azimut o ángulo azimutal. El cambio de proyección del resto de variables seguirá el mismo procedimiento.

Para determinar la evolución del calentamiento en el centro del sistema en los instantes previos y posteriores a la TT de Ophelia se ha obtenido la temperatura potencial (θ) máxima en $r = 0$ (es decir, el máximo de θ en altura) y temperatura potencial equivalente (θ_e) máxima en $z = 0$ (es decir, el máximo de θ_e en superficie). Se han calculado valores del coeficiente de correlación de Pearson entre ambas variables durante la evolución del sistema.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Caracterización del Huracán Ophelia

El Huracán Ophelia se desarrolló en el Atlántico Norte central y evolucionó hacia el Atlántico Norte oriental debido a la circulación del oeste (Fig. 2a). Los primeros instantes del sistema estuvieron caracterizados por una depresión aislada en niveles altos y una baja baroclina en superficie (Fig. 2b), en yuxtaposición con temperaturas superficiales del mar cálidas ($> 26^\circ\text{C}$).

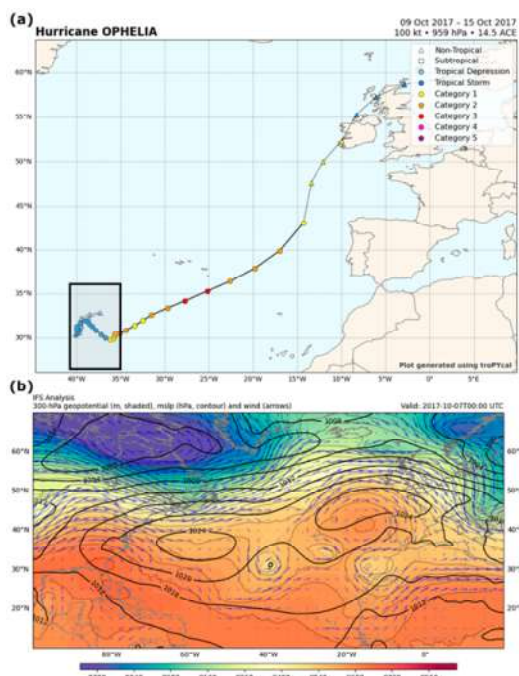


Fig. 2: (a) Trayectoria e intensidad del Huracán Ophelia en 2017. El recuadro negro indica el área donde sucedió la TT y área de simulación correspondiente a la Figura 1. (b) Geopotencial y viento a 300 hPa (sombreado) y presión a nivel del mar (contornos) el 7 de octubre de 2017 a las 00 UTC obtenidos del análisis ECMWF-IFS.

Esta situación sinóptica favoreció alta actividad convectiva que desencadenó la TT. El sistema transicionó a ciclón tropical, intensificándose hasta un huracán de categoría 3, siendo el sistema más tropical cuya ciclogénesis fue una TT (Calvo-Sancho et al., 2022).

3.2. Calentamiento del sistema

En las TTs existen diferentes forzamientos dependiendo de la fase del proceso, siendo los forzamientos de procesos diabáticos y de convección húmeda profunda los predominantes para que el ciclón adquiriera naturaleza barotrópica. Los resultados de Calvo-Sancho et al. (2023a) y los mostrados en la presente comunicación son semejantes desde diferentes puntos de vista.

En la Figura 3 se muestra la evolución temporal de la TT Ophelia mediante cortes transversales de la temperatura potencial centrados en el ciclón y la Figura 4 muestra la relación y evolución temporal del máximo de θ en $r = 0$ y máximo de θ_e en $z = 0$. Los resultados muestran que predomina una naturaleza fría en los primeros instantes del sistema, tanto en superficie como en altura, y no se aprecia calentamiento en esta fase (Fig. 3a y 4). Es decir, en los primeros instantes domina una naturaleza baroclina de núcleo frío del sistema.

Como se ha mencionado en la introducción, la situación sinóptica y la alta temperatura superficial del mar favorecieron el inicio y el mantenimiento de la convección húmeda profunda. La TT comienza cuando el sistema inicia su calentamiento y los procesos diabáticos empiezan a cobrar importancia (Rotunno y Emanuel, 1987; Calvo-Sancho et al., 2023a), compartiendo características tanto de un ciclón baroclino como de un ciclón barotrópico (Fig. 3b y 4). No obstante, dado que comparten características de naturaleza fría y cálida, en estos pasos temporales se producen períodos de enfriamiento en la TT (Fig. 4).

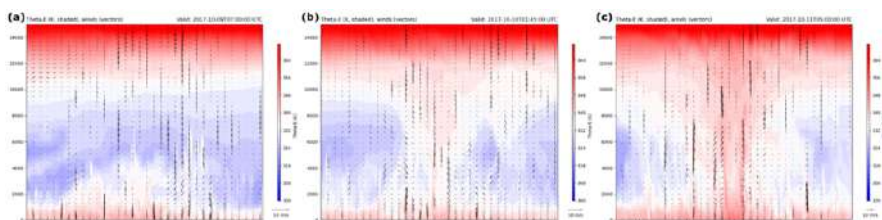


Fig. 3: Corte transversal de temperatura potencial centrado en el ciclón en distintas fases de la TT: (a) ciclón baroclino, (b) ciclón híbrido, (c) ciclón tropical.

Sin embargo, el centro del ciclón se calienta en la última etapa de la TT (Fig. 3c), dado que existe una relación positiva entre la θ en $r = 0$ y la θ_e en $z = 0$ (Fig. 4). Asimismo, este calentamiento y relación continúa cuando el ciclón se transforma en un ciclón tropical puro (último instantes analizados del huracán).

El coeficiente de correlación de Pearson entre va variando en función de la fase temporal que se analice. En general, existe una correlación significativa positiva $r = 0.7$ (p -valor < 0.05). Sin embargo, existe una correlación significativa mucho más

fuerte ($r = 0.92$; $p\text{-valor} < 0.001$) en las últimas etapas de la TT y la primera intensificación del Huracán Ophelia.

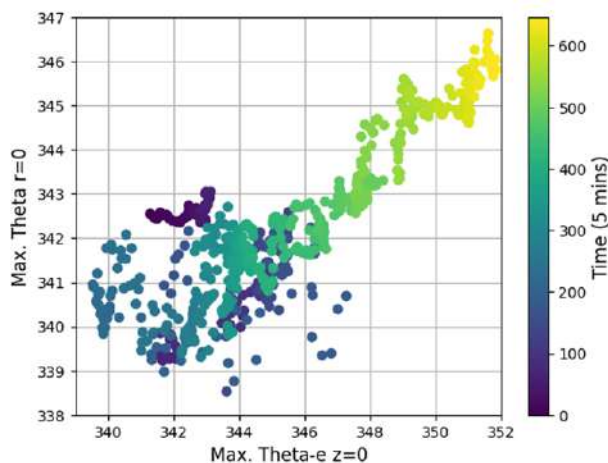


Fig. 4: Evolución temporal y relación entre el máximo de θ en $r = 0$ y máximo de θ_e en $z = 0$.

4. CONCLUSIONES

Este estudio analiza la evolución del calentamiento del centro de la TT del Huracán Ophelia en 2017. La evolución térmica del sistema presenta tres fases diferenciadas: 1) fase previa a la TT; 2) proceso de la TT; 3) última etapa de la TT y primera intensificación del ciclón tropical. En los instantes previos a la TT, el sistema presenta naturaleza fría baroclina. La TT comienza a desarrollarse cuando el sistema inicia su calentamiento y comparte características extratropicales y tropicales. Sin embargo, aparece un período de ligero enfriamiento que puede estar relacionado con una relajación del proceso de TT. Cuando los procesos diabáticos y la actividad convectiva predominan, el sistema comienza a calentarse, siendo ligeramente más efectivo el calentamiento en niveles bajos. Por lo tanto, el ciclón se transforma en un ciclón tropical.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo está parcialmente financiado por los proyectos de investigación PID2023-146344OB-I00 (CONSCIENCE). Este trabajo también tiene el apoyo de los Proyectos Especiales del ECMWF SPESMART y SPESVALE. Carlos Calvo-Sancho agradece el contrato otorgado por el Ministerio de Ciencia e Innovación – Programa FPI (PRE2020-092343).

REFERENCIAS

- Calvo-Sancho, C., González-Alemán, J.J., Bolgiani, P., Santos-Muñoz, D., Farrán, J.I., Martín, M.L., 2022. An environmental synoptic analysis of tropical transitions in the central and Eastern North Atlantic. *Atmospheric Research* 278, 106353. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2022.106353>
- Calvo-Sancho, C., Bolgiani, P., Subias, Á., Sastre, M., González-Alemán, J. J., & Martín, M. L. (2023a). Horizontal kinetic energy analysis of tropical transition simulations with the WRF and HARMONIE-AROME models. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 149(756), 2655-2677.
- Calvo-Sancho, C., Qutián-Hernández, L., González-Alemán, J. J., Bolgiani, P., Santos-Muñoz, D., & Martín, M. L. (2023b). Assessing the performance of the HARMONIE-AROME and WRF-ARW numerical models in North Atlantic Tropical Transitions. *Atmospheric Research*, 291, 106801.
- Calvo-Sancho, C., Qutián-Hernández, L., Bolgiani, P., González-Alemán, J. J., Santos-Muñoz, D., & Martín, M. L. (2023c). Assessment of HARMONIE-AROME in the simulation of the convective activity associated to a subtropical transition using satellite data. *Atmospheric Research*, 290, 106794.
- Davis, C.A., Bosart, L.F., 2003. Baroclinically Induced Tropical Cyclogenesis. *Mon. Wea. Rev.* 131, 2730–2747. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(2003\)131<2730:BITC>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(2003)131<2730:BITC>2.0.CO;2)
- Davis, C.A., Bosart, L.F., 2004. The TT problem: Forecasting the tropical transition of cyclones. *BAMS*. 85, 11, 1657-1662. <http://dx.doi.org/10.1175/BAMS-85-11-1657>
- Galarneau, T.J., McTaggart-Cowan, R., Bosart, L.F., Davis, C.A., 2015. Development of North Atlantic Tropical Disturbances near Upper-Level Potential Vorticity Streamers. *Journal of the Atmospheric Sciences* 72, 572–597. <https://doi.org/10.1175/JAS-D-14-0106.1>
- Hong, S. Y., Noh, Y., & Dudhia, J. (2006). A new vertical diffusion package with an explicit treatment of entrainment processes. *Monthly weather review*, 134(9), 2318-2341.
- Hong, S. Y., & Lim, J. O. J. (2006). The WRF single-moment 6-class microphysics scheme (WSM6). *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, 42(2), 129-151.
- Jiménez, P. A., Dudhia, J., González-Rouco, J. F., Navarro, J., Montávez, J. P., & García-Bustamante, E. (2012). A revised scheme for the WRF surface layer formulation. *Monthly weather review*, 140(3), 898-918.
- Lenzen, M., Malik, A., Kenway, S., Daniels, P., Lam, K.L., Geschke, A., 2019. Economic damage and spillovers from a tropical cyclone. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 19, 137–151. <https://doi.org/10.5194/nhess-19-137-2019>
- Mlawer, E. J., Taubman, S. J., Brown, P. D., Iacono, M. J., & Clough, S. A. (1997). Radiative transfer for inhomogeneous atmospheres: RRTM, a validated correlated-k model for the longwave. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 102(D14), 16663-16682.
- Moore, P. (2021). An analysis of storm Ophelia which struck Ireland on 16 October 2017. *Weather*, 76(9), 301-306.

- Peduzzi, P., Chatenoux, B., Dao, H., De Bono, A., Herold, C., Kossin, J., Mouton, F., Nordbeck, O., 2012. Global trends in tropical cyclone risk. *Nature Clim Change* 2, 289–294. <https://doi.org/10.1038/nclimate1410>
- Quitíán-Hernández, L., Bolgiani, P., Santos-Muñoz, D., Sastre, M., Díaz-Fernández, J., González-Alemán, J. J., ... & Martín, M. L. (2021). Analysis of the October 2014 subtropical cyclone using the WRF and the HARMONIE-AROME numerical models: Assessment against observations. *Atmospheric Research*, 260, 105697.
- Rotunno, R., & Emanuel, K. A. (1987). An air–sea interaction theory for tropical cyclones. Part II: Evolutionary study using a nonhydrostatic axisymmetric numerical model. *Journal of Atmospheric Sciences*, 44(3), 542–561.
- Skamarock, W. C., Klemp, J. B., Dudhia, J., Gill, D. O., Liu, Z., Berner, J., ... & Huang, X. Y. (2019). A description of the advanced research WRF version 4. *NCAR tech. note ncar/tn-556+ str*, 145.
- McTaggart-Cowan, R., Galarneau, T.J., Bosart, L.F., Moore, R.W., Martius, O., 2013. A Global Climatology of Baroclinically Influenced Tropical Cyclogenesis. *Monthly Weather Review* 141, 1963–1989. <https://doi.org/10.1175/MWR-D-12-00186.1>.