

IDENTIFICACIÓN Y DISTRIBUCIÓN TEMPORAL DE TRANSICIONES TROPICALES EN EL OCÉANO ATLÁNTICO NORTE

Carlos CALVO-SANCHO¹, Juan Jesús GONZÁLEZ-ALEMÁN², María Yolanda LUNA², Pedro BOLGIANI³, Daniel SANTOS-MUÑOZ⁴, Lara QUITIÁN-HERNÁNDEZ¹, Mariano SASTRE³, Francisco VALERO^{3,5}, José Ignacio FARRÁN¹, Javier DÍAZ-FERNÁNDEZ³, María Luisa MARTÍN^{1,5}

¹*Departamento de Matemáticas Aplicadas, Facultad de Ingeniería Informática, Universidad de Valladolid, Segovia, España.*

³*Departamento de Física de la Tierra y Astrofísica, Facultad de Física, Universidad Complutense de Madrid, Madrid, España.*

⁴*Danmarks Meteorologiske Institut, Copenhagen, Dinamarca.*

²*Instituto Interdisciplinario Matemático (IMI), Universidad Complutense de Madrid, Madrid, España.*

carlos.calvo.sancho@uva.es

RESUMEN

En los últimos años, Europa occidental ha sido amenazada por ciclones tropicales anómalos que han resultado de transiciones tropicales (TT) -proceso donde un ciclón baroclino se transforma en un ciclón tropical-, como fueron los huracanes Ophelia, Leslie o Vince. En el período 1979-2019 se han identificado 33 TTs en el Atlántico Norte Central (cATLN) y en el Atlántico Norte Oriental (oATLN) utilizando la base de datos HURDAT y el reanálisis atmosférico ERA-5.

Este trabajo ha avanzado en el conocimiento sobre la génesis de las TTs en el Atlántico Norte, sobre que estructuras ciclónicas previas son más frecuentes y en su distribución temporal en el período de estudio. Los resultados muestran que los ciclones subtropicales son la estructura ciclónica más frecuente que transiciona a ciclón tropical, mientras que, de todas las TTs, más de la mitad evoluciona a huracán en su intensidad máxima. En la cuenca del cATLN evolucionan las TTs con mayor ciclo de vida y, a su vez, se concentra una mayor densidad. Sin embargo, las TTs que han transicionado en el cATLN pueden entrar en la cuenca del oATLN gracias al flujo del oeste.

Las TTs se encuentran favorecidas para su desarrollo donde se solapa una zona baroclina con unas temperaturas de la superficie del mar (SST) cálidas. Por lo tanto, muestran una estacionalidad en los meses entre septiembre y noviembre, cuando más del 70% de las TTs se desarrollan. En la cuenca del cATLN el máximo son los meses de septiembre y noviembre, ligado a altos valores de SST; mientras que en la cuenca del oATLN, la máxima actividad se registra en octubre, relacionado con la extensión más al norte de las SSTs cálidas y, a su vez, de la mayor frecuencia de depresiones aisladas en niveles altos.

Palabras clave: transiciones tropicales, ciclogénesis tropical, Atlántico Norte, ERA-5, HURDAT.

ABSTRACT

Western Europe has been threatened by anomalous tropical cyclones resulting from tropical transitions (TTs) - the process where a baroclinic cyclone transforms into a tropical cyclone - such as hurricanes Ophelia, Leslie or Vince. In the period 1979-2019, 33 TTs have been identified in the Central North Atlantic (cATLN) and Eastern North Atlantic (oATLN) using the HURDAT database and the ERA-5 atmospheric reanalysis.

This survey has advanced the knowledge on the genesis of TTs in the North Atlantic, on which previous cyclonic structures are more frequent and on their temporal distribution in the study period. Subtropical cyclones are the most frequent cyclonic structure for transition to a tropical cyclone; more than half of all TTs evolve to a hurricane at their maximum intensity. cATLN TTs has the longest life cycle evolve and the highest density. However, cyclones have transitioned in the cATLN can enter the oATLN basin thanks to the westerly flow.

TTs are favored for their development where a baroclinic zone overlaps with warm sea surface temperatures (SST). Therefore, they show a seasonality in the months between September and November, when more than 70% of the TTs develop. In the cATLN basin, the maximum activity is in September and November, linked to high SST values; while in the oATLN basin, the maximum activity is recorded in October, related to the northern extension of warm SSTs and, in turn, to the greater frequency of isolated depressions at high levels.

Key words: tropical transitions, tropical cyclogenesis, North Atlantic, ERA-5, HURDAT.

1. INTRODUCCIÓN

Los ciclones tropicales (TCs) tienen un importante impacto socioeconómico sobre la población en general. Estos impactos son de índole diverso (en agricultura debido las inundaciones y fuerza del viento, pérdidas humanas, daños en bienes e inmuebles, problemas de seguridad o riesgos medioambientales; Peduzzi et al. 2012; Lenzen et al. 2019). Las ciclogénesis tropicales son favorecidas debido a una serie de perturbaciones precursoras en unos ambientes atmosféricos apropiados: temperaturas cálidas de la SST, fuerte divergencia en nivel altos, baja cizalladura vertical, vorticidad ciclónica en niveles bajos y humedad en niveles medios (Gray 1968; DeMaria et al. 2001; McTaggart-Cowan et al. 2013). Una de estas perturbaciones puede ser en forma de transición tropical (TT; Davis y Bosart, 2004). Los TCs formados mediante TT son ciclones que tienen probabilidades de que afecten a Europa, dado que su génesis se sitúa en los subtrópicos y en latitudes medias. En los últimos 15 años, Europa occidental se ha visto amenazada por TCs anómalos que resultaron de una TT, como los huracanes Ophelia, Leslie o Vince (Tapiador et al. 2007; Beven et al. 2008; Steward 2018). Por lo tanto, una mejora del conocimiento de estos sistemas podría reflejarse en un importante beneficio socioeconómico para las regiones afectadas (Galarneau et al. 2015).

McTaggart-Cowan et al. (2013) indican que el 16% de las ciclogénesis tropical en el período 1948-2010 provienen de TTs, siendo este valor mayor sobre la cuenca del

Atlántico Norte. La TT es una forma de ciclogénesis tropical descrita relativamente de forma reciente (Davis and Bosart, 2004) y está asociada con precursores extratropicales, es decir, es el proceso por el que un ciclón baroclino -con una perturbación en la alta tropósfera con origen en latitudes medias- evoluciona y se transforma en un TC. Normalmente, la perturbación está formándose en conjunto con rupturas de ondas de Rossby (McIntyre y Palmer, 1983; Thorncroft et al. 1993; Martius et al. 2008). Estas rupturas pueden resultar en diferentes fenómenos: depresiones aisladas en niveles altos (DANAs o *cut-off low*; Palmén y Newton, 1969; Nieto et al. 2005), corrientes de vorticidad potencial (PV; Martius et al. 2008; Galarneau et al. 2015) y las vaguadas de la alta tropósfera tropical (TUTT; Sadler 1976; Ferreira y Schubert, 1999; Patla et al. 2009). Por lo tanto, las perturbaciones en niveles altos tienen el potencial para evolucionar hacia una TT en ambientes caracterizados por bajas temperaturas de la SST (McTaggart-Cowan et al. 2015) y cizalladura vertical moderada-alta (Bracken and Bosart, 2000; Molinari et al. 2004; McTaggart-Cowan et al. 2008, 2013).

Las TTs se desarrollan con mayor frecuencia en el Atlántico Norte occidental, mientras que en el Atlántico Norte oriental son menos comunes debido a que las condiciones ambientales para su formación o duración son marginales (Galarneau et al. 2015). Las TTs tienden a desarrollarse en el océano subtropical (latitud entorno a 30°N) donde los ciclones de latitudes medias pueden transportar humedad del océano y de regiones tropicales (Davis y Bosart 2003, 2004). Comparando las cuencas del Atlántico Norte en las mismas latitudes, la SST sobre la zona oriental es más baja, la cizalladura vertical del viento es más alta y, durante el verano, la subsidencia asociada a la rama descendente de la circulación de la célula de Hadley genera unas condiciones de más estabilidad y sequedad (Hoskins et al. 2020). Sin embargo, durante las estaciones de otoño e invierno estas regiones cambian sus condiciones y pueden estar afectadas ocasionalmente por las TTs (Knapp et al. 2010).

Este trabajo analiza las TTs sobre las cuencas del Atlántico Norte occidental y oriental en el período 1979-2020 desde un punto de vista climatológico. El objetivo es analizar las diferencias entre cuencas en la distribución espacial y temporal de las TTs en el período 1979-2020 frente a la base de datos de huracanes (HURDAT).

2. MÉTODOS

Se ha seleccionado una serie de TTs desarrollados sobre el Atlántico Norte en el período 1979-2019 compilados en HURDAT, identificados por el Centro Nacional de Huracanes de Estados Unidos. Los ciclones son seleccionados de la siguiente forma: los TCs formados de un proceso de TT en el período de estudio sobre la región del Atlántico Norte que comprende $> 60^{\circ}\text{W}$ de longitud y $> 20^{\circ}\text{N}$ de latitud. Para considerar un TC como una TT, el ciclón debe haber transicionado de una baja, ciclón extratropical, depresión subtropical o tormenta subtropical (LO, EX, SD o SS como se nombra en HURDAT; Landsea and Beven, 2019) a una depresión tropical, tormenta tropical o huracán (TD, TS o HU como se nombra en HURDAT). Se ha aplicado un criterio adicional para filtrar posibles TCs formados por ondas tropicales del este, pudiendo ser catalogadas como bajas y no como onda tropical (WV como se nombra en HURDAT): los informes de TC del Centro Nacional de Huracanes no

deben de hacer mención que una onda tropical ha intervenido en el proceso de ciclogénesis tropical.

El Centro Nacional de Huracanes usa la técnica de Dvorak para la clasificación de la intensidad de un TC (Dvorak, 1975). Aunque este método tiene elementos de subjetividad, su uso está apoyado para la clasificación satelital por predictores veteranos. No obstante, en las últimas décadas, el Centro Nacional de Huracanes ha implantado nuevas herramientas y fuentes de datos como suplemento a esta técnica, haciendo incoherente esta base de datos en el período seleccionado.

3. RESULTADOS Y DISCUSIONES

Una muestra de 30 TTs tanto de las cuencas del oATLN como del cATLN han sido detectados en el período 1979-2019. La Tabla 1 contiene más información sobre las TTs identificadas extraídas de HURDAT. Más del 70% de las TTs transicionaron desde ciclones subtropicales, mientras que solo un ciclón transicionó desde un ciclón extratropical. El resto de los ciclones no estaban identificados en su estructura. El 70% de los sistemas adquirieron la categoría de tormenta tropical en el momento de la TT, pero solo unos pocos ciclones transicionaron a una categoría de depresión tropical (13.3%) o a una categoría de huracán (16.7%). No obstante, más de la mitad de los sistemas alcanzaron la categoría de huracán en su intensidad máxima tras la TT (ejemplos de ellos son los Huracanes Ophelia, Vince o Leslie que afectaron a la península ibérica).

La Figura 1a muestra el recorrido de los ciclones y su localización en el momento de la TT, es decir, el primer momento cuando es designado como TC en la base de datos HURDAT. El recorrido de los ciclones muestra dos patrones: una mayor densidad en el Atlántico Norte central (cATLN) y una densidad menor y más errática en el Atlántico Norte oriental (oATLN). Remarcar que los ciclos de vida en cATLN son más longevos que en oATLN. Asimismo, los sistemas tropicales no se forman únicamente sobre el oATLN, sino que pueden transicionar sobre el cATLN y entrar en el oATLN conducidos por flujo de oestes.

Código NHC	Nombre tormenta	Dominio	Fecha de transición (t ₀)	Estado	Lat (°N)	Lon (°W)	MSLP (hPa)	Velocidad viento (Kt)
AL141980	IVAN	oATLN	1200 1980 OCT 04	TD	36.5	023.5	1009	30
AL181980	KARL	cATLN	1800 1980 NOV 25	HU	37.7	044.7	994	65
AL201984	LILI	cATLN	1200 1984 DIC 20	HU	31.1	052.4	1002	70
AL061990	EDOUARD	oATLN	1800 1990 AGO 06	TD	37.5	033.5	1012	25
AL141990	LILI	cATLN	0000 1990 OCT 11	HU	31.2	055.9	1005	65
AL111994	FLORENCE	cATLN	1800 1994 NOV 03	TD	25.3	052.2	1005	30
AL162001	NOEL	cATLN	1200 2001 NOV 05	HU	37.8	050.3	994	65
AL172001	OLGA	cATLN	1200 2001 NOV 24	TS	29.5	049.8	1000	50
AL122002	KYLE	cATLN	0000 2002 SEP 23	TS	33.2	049.1	1009	35
AL212003	PETER	cATLN	0600 2003 DIC 09	TS	20	037.4	998	40

Retos del Cambio Climático: impactos, mitigación y adaptación

AL162004	OTTO	cATLN	1800 2004 NOV 30	TS	31.7	051.0	1001	40
AL242005	VINCE	oATLN	1200 2005 OCT 09	TS	33.8	019.3	1006	55
AL292005	DELTA	cATLN	1200 2005 NOV 23	TS	27.4	041.2	989	50
AL112007	JERRY	cATLN	0000 2007 SEP 24	TS	37.1	046.3	1003	35
AL122008	LAURA	cATLN	1200 2008 SEP 30	TS	40.6	048.9	1000	50
AL092009	GRACE	oATLN	0600 2009 OCT 04	TS	38.5	029.5	998	40
AL032012	CHRIS	cATLN	1200 2012 JUN 19	TS	39.4	058.7	1003	40
AL142012	NADINE	oATLN	0000 2012 SEP 23	TS	30.4	025.9	1001	45
AL192012	TONY	cATLN	1800 2012 OCT 22	TD	21.9	051.8	1006	30
AL142013	MELISSA	cATLN	0600 2013 NOV 20	TS	34.1	051.4	995	45
AL012016	ALEX	oATLN	0600 2016 ENE 14	HU	29.3	029.6	998	65
AL102016	IAN	cATLN	1200 2016 SEP 15	TS	36.3	051.5	1005	45
AL012017	ARLENE	cATLN	0000 2017 ABR 20	TD	32.8	039.6	998	30
AL172017	OPHELIA	cATLN	0600 2017 OCT 09	TS	30.9	040.0	1012	35
AL042018	DEBBY	cATLN	0000 2018 AGO 08	TS	39.7	049.2	1010	35
AL052018	ERNESTO	cATLN	1800 2018 AGO 16	TS	42.4	042.1	1007	40
AL102018	JOYCE	cATLN	0000 2018 SEP 14	TS	33.1	044.4	1006	35
AL132018	LESLIE	cATLN	1800 2018 SEP 29	TS	34.3	051.3	994	45
AL162018	OSCAR	cATLN	1800 2018 OCT 27	TS	27.1	049.9	1005	50
AL182019	PABLO	oATLN	1800 2019 OCT 25	TS	35.9	032.7	995	40
Media			15 SEP		33.2	043.4	1002.0	44.2
Desv. Est.			8.76 días		05.4	010.3	5.9	12.2

Tabla 1. TTs identificados en las base de datos HURDAT en el período 1979-2019. El dominio mostrado es el Atlántico Norte oriental (oATLN) y el Atlántico Norte central (cATLN). La fecha de transición está referida las horas en UTC. El estado se refiere a: depression tropical (TD), tormenta tropical (TS) y huracán (HU).

La distribución mensual de las TTs (Fig. 1b) muestra que más del 70% están concentradas en otoño. Esto es consistente con su origen baroclino, dado que la circulación de latitudes medias se desplaza hacia el sur y, por lo tanto, las corrientes de vorticidad potencial y las DANAs son más frecuentes sobre esta región debido al incremento de la baroclinicidad. Aunque se han observado TTs en primavera y en el mes de diciembre, las TTs en el dominio cATLN principalmente se desarrollan en otoño, con un máximo en noviembre. Este máximo podría estar relacionado con la actividad elevada de las TUTTs en esos meses (Sadler, 1967), con un máximo de

actividad en septiembre concentrado entre 30°-40°N y 040°-060°W (Postel y Hitchmann, 1999). El debilitamiento de la dorsal anticiclónica subtropical, ligado a un incremento de las DANAS yuxtaponiéndose con la SST relativamente cálidas alcanzando su extensión más septentrional (Font, 1983), podría estar detrás del máximo de actividad en octubre de las TTs observada en oATLN. Por otra parte, el máximo de actividad en el oATLN en otoño también puede estar relacionado con la fase negativa de las Oscilación del Atlántico Norte (NAO) dado que su mínimo se registra en octubre, computada por las medias mensuales (no se muestra). Por otro lado, la frecuencia de las TTs muestra valores mínimos secundarios en invierno. En estos meses la liberación de calor latente no es tan frecuente como en otoño, por lo que la convección no tiene un rol tan relevante en el desarrollo de las TTs.

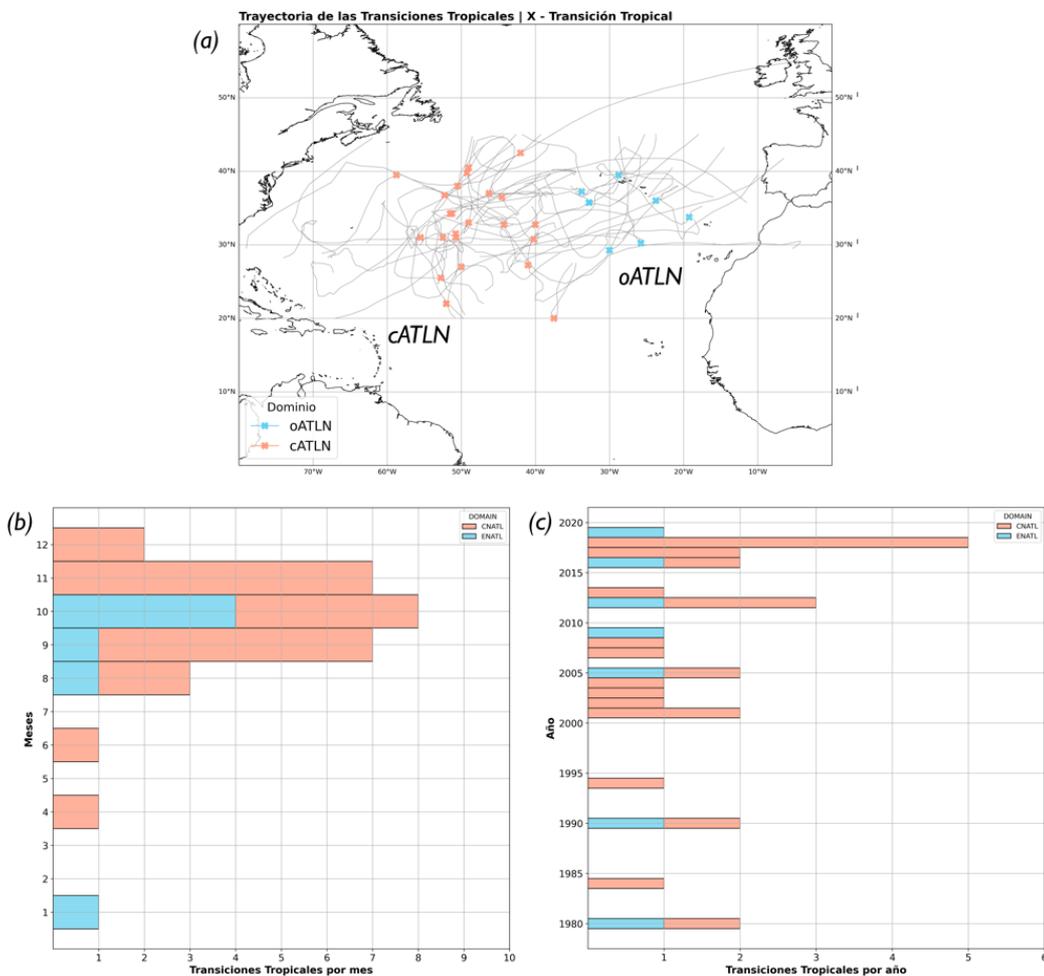


Figura 1: (a) Recorrido de los ciclones identificados que han transicionado a un TC en el Atlántico Norte durante el periodo 1979-2019. Las cruces indican la posición de los ciclones en el instante de la transición. El dominio rojo es para el Atlántico Norte central y el dominio azul es para el Atlántico Norte oriental. (b) Distribución mensual y (c) anual de las TTs identificadas en la cuenca del Atlántico Norte durante el periodo 1979-2019.

En este siglo se han registrado el 79% de las TTs y, de forma más precisa, el 48% del total se han observado en la última década (Fig. 1c). Aunque HURDAT sea una base de datos subjetiva que puede que no sea completamente coherente durante todo el período, los resultados muestran que el número de TTs ha incrementado de forma acuciante. Esto podría estar relacionado con los resultados obtenidos por Muñoz et al. (2020), que indican un incremento de las DANAs sobre el hemisferio norte en los últimos 70 años.

4. CONCLUSIONES

Este estudio desarrolla una climatología de TTs en la cuenca del Atlántico Norte durante el período de 1979-2019 con la base de datos HURDAT. Las TTs son identificadas mediante ciclones con estructura baroclina que transiciona a TC. Las estructuras ciclónicas más probables para transicionar a TC son los ciclones subtropicales, siendo el 70% de todos los registrados. En el instante de la TT, la gran mayoría de las TTs alcanzaron una categoría de tormenta tropical, evolucionando más del 50% de las TTs a huracán en su máxima intensidad. En el Atlántico Norte, la mayor densidad y los ciclos de vida más largos se localizan en el cATLN; sin embargo, las TTs que han transicionado sobre la cuenca del cATLN pueden entrar en la cuenca del oATLN gobernado por la circulación general del oeste. Las TTs en la cuenca del cATLN muestran su máxima actividad en otoño, relacionado con SSTs cálidas y, a su vez, podría estar conectado con TUTTs. Por otra parte, el máximo de actividad en la cuenca del oATLN es en octubre, vinculado con SSTs cálidas que alcanzan su máxima extensión septentrional, así como un incremento en la frecuencia de las DANAs, provocando que la región sea favorable para el desarrollo de la convección profunda. Por lo tanto, el desarrollo de las TTs está favorecido en una yuxtaposición de una zona baroclina con SSTs cálidas.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo está apoyado por el Instituto Matemático Interdisciplinario de la Universidad Complutense de Madrid. Este trabajo está parcialmente financiado por los proyectos de investigación PID2019-105306RB-I00 (IBERCANES) and CGL2016-78702 (SAFEFLIGHT). Este trabajo también tiene el apoyo de los Proyectos Especiales del ECMWF SPESMART y SPEVALE. Carlos Calvo-Sancho y Javier Díaz Fernández agradece el contrato otorgado por el Ministerio de Ciencia e Innovación – Programa FPI (PRE2020-092343 y BES-2017-080025, respectivamente).

REFERENCIAS

Beven, J.L., Stewart, S.R., Lawrence, M.B., Avila, L.A., Franklin, J.L., Pasch, R.J., (2003). ANNUAL SUMMARY: Atlantic Hurricane Season of 2001. *Mon. Wea. Rev.* 131, 1454–1484.
[https://doi.org/10.1175/1520-0493\(2003\)131<1454:ASHSO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(2003)131<1454:ASHSO>2.0.CO;2)
Bracken, W.E., Bosart, L.F., (2000). The Role of Synoptic-Scale Flow during Tropical Cyclogenesis over the North Atlantic Ocean. *Monthly Weather Rev* 128, 353. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(2000\)128<0353:TROSSF>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(2000)128<0353:TROSSF>2.0.CO;2)

- 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>
- DeMaria, M., Knaff, J.A., Connell, B.H., (2001). A Tropical Cyclone Genesis Parameter for the Tropical Atlantic. *Wea. Forecasting* 16, 219–233. [https://doi.org/10.1175/1520-0434\(2001\)016<0219:ATCGPF>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0434(2001)016<0219:ATCGPF>2.0.CO;2)
- Dvorak, V.F., (1975). Tropical Cyclone Intensity Analysis and Forecasting from Satellite Imagery. *Monthly Weather Review* 103, 420–430. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1975\)<0420:TCIAAF>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1975)<0420:TCIAAF>2.0.CO;2)
- Ferreira, R.N., Schubert, W.H., (1999). The Role of Tropical Cyclones in the Formation of Tropical Upper-Tropospheric Troughs. *JOURNAL OF THE ATMOSPHERIC SCIENCES* 56, 17.
- Font, I., (1983). *Climatología de España y Portugal*. Sección de publicaciones del Instituto Nacional de Meteorología. 296 pp. ISBN: 84-500-9467-4
- 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>
- Gray, W.M., (1968). Global view of the origin of tropical disturbances and storms. *Mon. Wea. Rev.* 96, 669-700. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1968\)096%3C0669:GVOTOO%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1968)096%3C0669:GVOTOO%3E2.0.CO;2)
- Hoskins, B.J., Yang, G-Y, Fonseca, R.M., (2020). The detailed dynamics of the June–August Hadley Cell. *Q.J.R. Meteorol. Soc.* 146, 557– 575. <https://doi.org/10.1002/qj.3702>
- Knapp, K.R., Kruk, M.C., Levinson, D.H., Diamond, H.J., Neumann, C.J., (2010). The International Best Track Archive for Climate Stewardship (IBTrACS): Unifying Tropical Cyclone Data. *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 91, 363–376. <https://doi.org/10.1175/2009BAMS2755.1>
- Landsea, C.W. and Beven, J., (2019). The revised Atlantic hurricane database (HURDAT2). <https://www.nhc.noaa.gov/data/hurdat/hurdat2-format-nov2019.pdf>
- 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>
- Martius, O., Schwierz, C., Sprenger, M., (2008). Dynamical tropopause variability and potential vorticity streamers in the Northern Hemisphere — A climatological analysis. *Adv. Atmos. Sci.* 25, 367–380. <https://doi.org/10.1007/s00376-008-0367-z>
- McIntyre, M.E., Palmer, T.N., (1983). Breaking Planetary Waves in the Stratosphere. *Nature* 305, 593–600. <https://doi.org/10.1038/305593a0>
- McTaggart-Cowan, R., Deane, G.D., Bosart, L.F., Davis, C.A., Galarneau, T.J., (2008). Climatology of Tropical Cyclogenesis in the North Atlantic (1948–2004). *Monthly Weather Review* 136, 1284–1304. <https://doi.org/10.1175/2007MWR2245.1>
- 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>

- McTaggart-Cowan, R., Davies, E.L., Fairman, J.G., Galarneau, T.J., Schultz, D.M., 2015. Revisiting the 26.5°C Sea Surface Temperature Threshold for Tropical Cyclone Development. *Bulletin of the American Meteorological Society* 96, 1929–1943. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-13-00254.1>
- Molinari, J., Vollaro, D., Bosart, L.F., Corbosiero, K.L., 2004. Tropical Cyclone Formation in a Sheared Environment: A Case Study. *Journal of the Atmospheric Sciences* 61-21, 2493-2509. <https://doi.org/10.1175/JAS3291.1>
- Muñoz, C., Schultz, D., Vaughan, G., 2020. A Midlatitude Climatology and Interannual Variability of 200- and 500-hPa Cut-Off Lows. *Journal of Climate* 33, 2201–2222. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-19-0497.1>
- Nieto, R., Gimeno, L., de la Torre, L., Ribera, P., Gallego, D., García-Herrera, R., García, J.A., Nuñez, M., Redaño, A., Lorente, J., 2005. Climatological Features of Cutoff Low Systems in the Northern Hemisphere. *Journal of Climate* 18, 3085–3103. <https://doi.org/10.1175/JCLI3386.1>
- Patla, J.E., Stevens, D., Barnes, G.M., 2009. A Conceptual Model for the Influence of TUTT Cells on Tropical Cyclone Motion in the Northwest Pacific Ocean. *Weather and Forecasting* 24, 1215–1235. <https://doi.org/10.1175/2009WAF2222181.1>
- 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>
- Postel, G.A., Hitchman, M.H., 1999. A Climatology of Rossby Wave Breaking along the Subtropical Tropopause. *J. Atmos. Sci.* 56, 359–373. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1999\)056<0359:ACORWB>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1999)056<0359:ACORWB>2.0.CO;2)
- Sadler, J.C., 1976. A Role of the Tropical Upper Tropospheric Trough in Early Season Typhoon Development. *Monthly Weather Review* 104, 1266–1278. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1976\)104<1266:AROTTU>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1976)104<1266:AROTTU>2.0.CO;2)
- Stewart, S.R.: Hurricane Ophelia (AL172017). NHC Tropical Cyclone Report.
- Tapiador, F.J., Gaertner, M.A., Romera, R., Castro, M., 2007. A Multisource Analysis of Hurricane Vince. *Bulletin of the American Meteorological Society* 88, 1027–1032. <https://doi.org/10.1175/BAMS-88-7-1027>
- Thorncroft, C.D., Hoskins, B.J., McIntyre, M.E., 1993. Two paradigms of baroclinic-wave life-cycle behaviour. *Q.J Royal Met. Soc.* 119, 17–55. <https://doi.org/10.1002/qj.49711950903>