



Centro de Investigaciones Geofísicas y Escuela de Física, Universidad de Costa Rica
Academia Nacional de Ciencias de Costa Rica
(jorge.amador@ucr.ac.cr)

Ciclones tropicales en el mar Caribe, el océano Pacífico tropical del este y el Atlántico norte en el contexto del calentamiento global 1966-2023: distribuciones estacionales y tendencias temporales

Jorge A. Amador
Blanca Calderón



Centro de Investigaciones Geofísicas, Universidad de Costa Rica
(blancaalderonsolera@ucr.ac.cr)

El sistema climático terrestre (SCT), constituido físicamente por la atmósfera, la litósfera, la hidrósfera, la criósfera y la biósfera, es una compleja estructura del ambiente natural en la que sus componentes interactúan, en tiempo y espacio, de manera no lineal. Pequeñas fluctuaciones en uno de sus constituyentes pueden producir una significativa variabilidad en los otros elementos del sistema. El SCT es dinámico, se rige por las leyes físicas de interacción de los medios continuos (por ejemplo, las propias de los líquidos y gases), los cuales están sujetos a procesos de elongación, deformación y rotación. La evolución interna y la estabilidad dinámica del sistema están determinadas por procesos energéticos producto de otras interrelaciones, como lo son los cambios de fase entre diferentes estados termodinámicos del SCT (sólidos, líquidos y gases). Otras transformaciones pueden deberse a forzantes físicos externos e internos al sistema, entre ellos, variaciones en la radiación solar recibida o emisiones volcánicas significativas como las del Pinatubo en 1991 (Boretti, 2024) y el Hunga Tonga–Hunga Ha'apai en 2022 (Terry *et al.*, 2022).

La atmósfera terrestre, una de las componentes del SCT, es en promedio, un agregado de nitrógeno ($\approx 78\%$) y de oxígeno ($\approx 21\%$). El 1% restante de su composición química es una combinación de argón, dióxido de carbono (CO_2) y vapor de agua (VA), entre otros gases. A pesar de las concentraciones relativamente pequeñas del CO_2 y el VA, con respecto a las del nitrógeno y del oxígeno, éstos juegan un papel fundamental en el balance de energía planetaria, ya que alteraciones en su concentración pueden provocar redistribuciones de energía en alguno(s) de los componentes del sistema.

El conocimiento sobre las concentraciones atmosféricas de gases y su impacto en el SCT tienen bases científicas históricas dignas de mencionar. Entre ellas, son notables las investigaciones de Henry Cavendish (1731-1810), físico y químico inglés, quien al trabajar sobre la composición del agua, fue el primero en obtener hidrógeno (<https://www.lifeder.com/henry-cavendish/>) y las de Joseph Priestley (1733-1804), científico, político y químico inglés, quien descubrió el agua carbonatada (soda) y el oxígeno como gas (<https://www.lifeder.com/joseph-priestley/>). Otros trabajos como el del irlandés John Tyndall (ca1822-1893), sobre coloides y la absorción de rayos de luz por esa mezcla, y el del fisicoquímico sueco Svante Arrhenius (1857-1927), sobre la influencia del carbono en la temperatura superficial del suelo, permitieron avances en el entendimiento de las interacciones entre los gases atmosféricos y los procesos radiativos terrestres. Debido a los experimentos

realizados por Tyndal y Arrhenius, la comunidad científica internacional, les considera como los precursores de los conceptos ligados al efecto invernadero en la atmósfera terrestre. Sin embargo, Eunice Newton Foote (1819-1888), física y activista por los derechos humanos (en especial los de las mujeres), de origen estadounidense, había realizado, alrededor de unos tres años antes que esos dos científicos, un extraordinario experimento sobre la absorción de la luz solar por el carbono y el VA, concepto fundamental para entender la variabilidad e interacciones entre las componentes del SCT y el potencial impacto de los gases de efecto invernadero (GEI) en el sistema. Varios autores coinciden en que el trabajo de Foote no ha recibido el mérito histórico que merece (Sorenson, 2011; Jackson, 2020; Shapiro, 2021), de ahí su reconocimiento en este artículo.

A partir de la Revolución Industrial (RI) del siglo XVIII, se ha observado, en especial en la atmósfera, un aumento en las concentraciones de los Gases de Efecto Invernadero (GEI) considerado de origen antropogénico; entre ellos, el CO_2 , el metano y los clorofluorocarbonos. Una de las consecuencias conocidas de modificar la estructura química de la atmósfera terrestre, a partir de un estado inicial con solo un forzante externo (los GEI), es que las otras componentes del SCT, reaccionan mediante interacciones no lineales (en espacio y tiempo), para conducir al sistema a un nuevo estado de equilibrio radiativo. Este incremento de los GEI produce una absorción adicional de radiación solar en

la troposfera, lo que provoca un calentamiento en esa región, con el impacto físico en las otras partes del SCT, en el caso terrestre especialmente en los océanos.

Aunque el sistema Tierra ha pasado anteriormente por etapas de calentamiento y enfriamiento, lo que produce modificaciones importantes en el clima (RMS, 2024; Boretti, 2024), se estima que las presentes alteraciones están asociadas a la pasada y actual influencia humana, luego de la RI. El calentamiento global del SCT en las últimas décadas (alrededor de 1.2 °C; Bardon, 2023) atribuido a las variaciones en las concentraciones de GEI (con diferentes impactos en los climas regionales) ha resultado, según indican las observaciones

de registros modernos (NASA, 2024; Deng, 2024, Storto y Yang, 2024), en que alrededor del 90 % de ese calentamiento está ocurriendo en los océanos. El calentamiento del agua en los océanos tiene un efecto de expansión del fluido y el consecuente incremento en el nivel del mar a nivel global. El aumento de temperatura de la superficie marina y de la capa límite oceánica no solo impacta la biodiversidad sino que al mismo tiempo favorece las condiciones dinámicas y termodinámicas para exacerbar el desarrollo de sistemas meteorológicos, cuyos ciclos de vida dependen de los cambios de fase, mediante mecanismos de evaporación, convección y precipitación. Los trópicos son regiones únicas para el desarrollo

de convección profunda asociada a una gran diversidad de sistemas vorticales y ondulatorios, cuya más relevante covariabilidad es la precipitación. Los ciclones tropicales (CT), entre esos sistemas, merecen un estudio especial, ya que en estas regiones tropicales los eventos hidrometeorológicos producidos por ellos, son los que mayor impacto social producen, presentando cuantiosas pérdidas de vidas humanas y económicas durante las últimas décadas (ver, por ejemplo, Amador, 2011; Amador y Alfaro, 2014; Amador *et al.* 2018; Maldonado *et al.*, 2020).

En este artículo se investiga si en las cuencas ciclónicas cercanas a la región (Figura 1); el mar Caribe (MC,

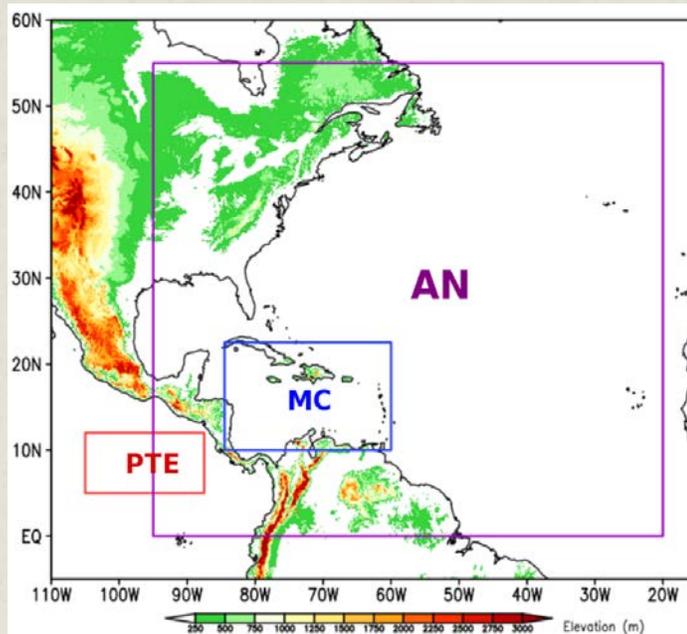


Figura 1. Cuencas oceánicas utilizadas para el análisis de ciclones tropicales; el mar Caribe (MC, 10.0 - 22.5° N, 60.0 - 82.5° O), el océano Pacífico tropical del este (PTE, 5.0 - 12.0° N, 87.5 - 105.0° O) y el Atlántico norte (AN, 0 - 55.0° N, 20.0 - 95.0° O).

10.0 - 22.5° N, 60.0 - 82.5° O); el océano Pacífico tropical del este (PTE, 5.0 - 12.0° N, 87.5 - 105.0° O) y el Atlántico norte (AN, 0 - 55.0° N, 20.0 - 95.0° O), la frecuencia estacional y anual de CT han tenido alteraciones significativas en sus distribuciones entre 1966 (año en que se iniciaron las observaciones satelitales) y 2023, que puedan ser atribuidas al calentamiento global y a cambios en el clima regional. La extensión de cada área ha sido utilizada anteriormente para análisis de este tipo de problemas (Amador *et al.*, 2016a, b). La relación circa entre áreas del PTE; MC y AN es de 1; 4.47 y 53.09; con PTE = 743652 km², respectivamente. La extensión de cada área tiene importancia si se analiza la densidad de CT en cada una de ellas, aspecto no tratado en este artículo, pues lo que interesa son las distribuciones estacionales y las tendencias en cada una de esas regiones. Se utiliza la base de datos Hurricane Database Second Generation (HURDAT2; Ladsea y Franklin, 2013), que consiste en un análisis de cada CT recopilado por el *National Hurricane Center* (NHC) y el *Central Pacific Hurricane Center* (CPHC), a partir de observaciones tanto en tiempo real como de datos registrados posteriores a cada evento. Los datos incluyen las trayectorias, los vientos máximos sostenidos en un minuto *a circa* 10 m de altura, la categoría y la presión mínima cada seis horas, para cada evento registrado. HURDAT2 cubre el AN desde 1851 hasta 2022, y el Pacífico central norte y noreste desde 1949 hasta 2022. Dado que HURDAT2 no incluye el año 2023, la data

se obtuvo de los reportes del NHC y CPHC. Para el estudio de las frecuencias estacionales e interanuales de los CT, se filtran los datos de HURDAT2 para el periodo 1966-2023 y se analizan las tres regiones ciclogénicas citadas (**Figura 1**). Luego, se hace un recuento estacional y anual del número de depresiones tropicales (DT), tormentas tropicales (TT), huracanes (H) con magnitud de vientos entre 119 y 177 km/h y grandes huracanes (GH), definidos de acuerdo con la escala Saffir-Simpson (Taylor *et al.*, 2010), estos últimos con vientos sostenidos superiores a 178 km/h. Para el estudio, solo se considera la máxima categoría anual alcanzada por los CT en cada región analizada. Se explora también, la distribución mensual de cada categoría (DT, TT, H y HM), agrupando esta distribución en conjuntos decadales, excepto el penúltimo que es de ocho años; a) 1966-1975, b) 1976-1985, c) 1986-1995, d) 1996-2005, e) 2006-2015, f) 2016-2023 y los acumulados para el periodo total, g) 1966-2023.

El PTE es la menor de las áreas analizadas y por ende la que tiene menor densidad de CT, en general, por unidad de área (**Figuras 1, 2, 3**). Las DT (en celeste) no presentan un patrón estacional bien definido, siendo julio y en casos octubre los meses con una frecuencia que resalta sobre los otros meses (**Figura 2a - f**, en especial la **Figura 2g**). Las TT (en azul) presentan una alta variabilidad estacional en los subperiodos investigados, en los que julio-agosto y octubre predominan en el desarrollo de

estos sistemas. Es notable que en algunos de los subperiodos los TT se desarrollan al inicio de la temporada lluviosa en la región del PTE, posiblemente relacionados con la migración hacia el norte de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCI). Curiosamente, los H y GH (en rosado y rojo, respectivamente), representan sistemas con frecuencias estacionales bajas o muy bajas comparados con los otros dos sistemas, las DT y las TT. Es relevante indicar que durante el último periodo analizado, 2016-2023, no se desarrollaron huracanes (**Figura 2f**), a pesar del calentamiento global observado en los océanos.

La **Figura 3** muestra la distribución mensual total de DT (celeste), TT (azul), H (rosado) y GH (rojo), para el MC para los periodos investigados. Las DT se caracterizan por una marcada variabilidad decadal según las categorías temporales usadas. En el MC, se observa que las DT están distribuidas, en especial en los primeros tres subperiodos (**Figuras 3a-c**), a lo largo de una estación ciclónica, que es más extensa (6 a 8 meses), que la de los últimos 28 años (**Figuras 3d, e, f**), con un número menor de meses con esa categoría (2 a 4 meses). Los picos de DT tienen gran variabilidad estacional, como

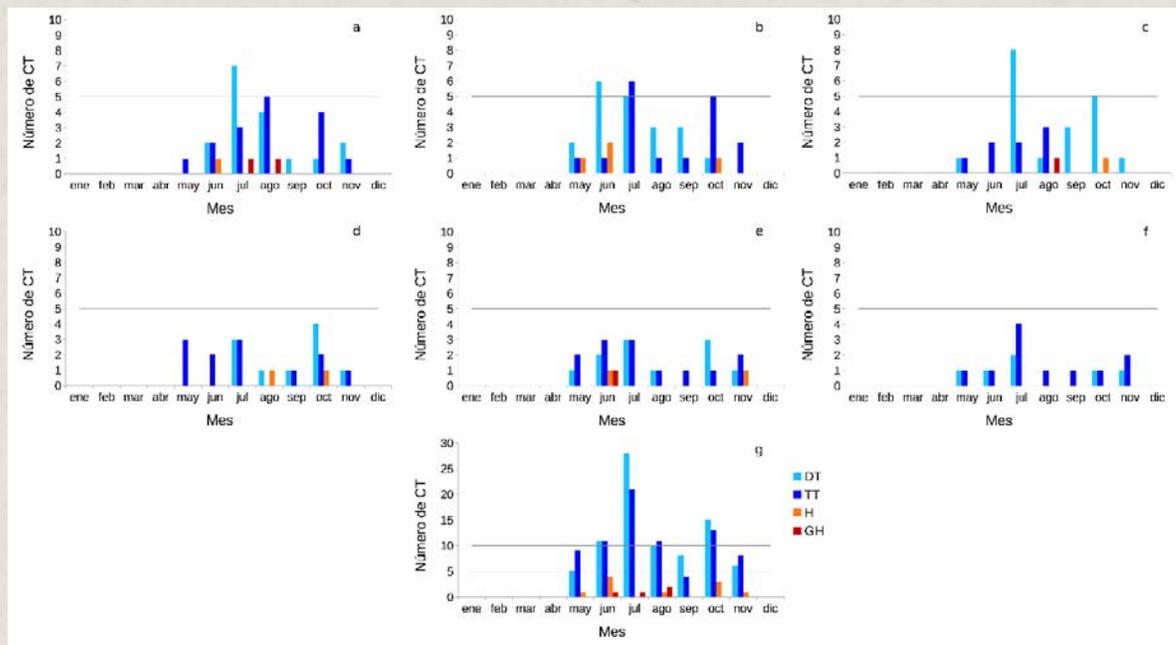


Figura 2. Distribución mensual media de depresiones tropicales (DT, celeste), tormentas tropicales (TT, azul), huracanes (H, rosado) y grandes huracanes (GH, rojo), de acuerdo con la escala de Saffir-Simpson, para el Pacífico tropical del este para los periodos: a) 1966-1975, b) 1976-1985, c) 1986-1995, d) 1996-2005, e) 2006-2015, f) 2016-2023 y g) 1966-2023. Fuentes: Hurricane Database Second Generation (HURDAT2), National Hurricane Center (NHC) y Central Pacific Hurricane Center (CPHC). Ver texto para otras definiciones.

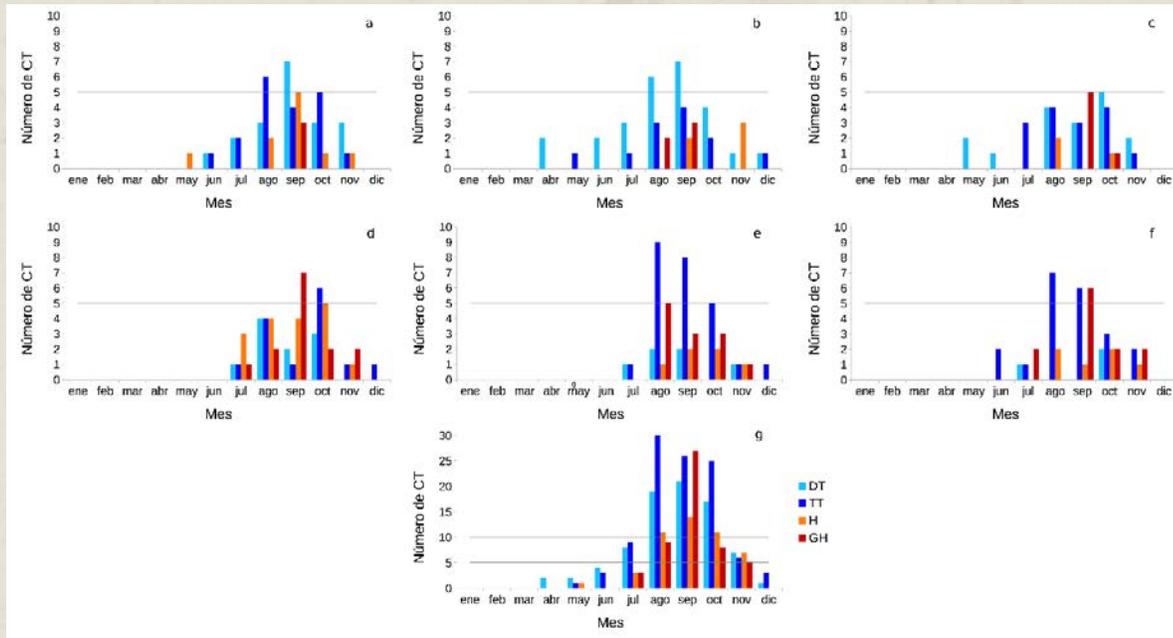


Figura 3. Distribución mensual media de depresiones tropicales (DT, celeste), tormentas tropicales (TT, azul), huracanes (H, rosado) y grandes huracanes (HM, rojo), de acuerdo con la escala de Saffir-Simpson, para el mar Caribe para los periodos: a) 1966-1975, b) 1976-1985, c) 1986-1995, d) 1996-2005, e) 2006-2015, f) 2016-2023 y g) 1966-2023. Fuentes: Hurricane Database Second Generation (HURDAT2), National Hurricane Center (NHC) y Central Pacific Hurricane Center (CPHC). Ver texto para definiciones.

se desprende al comparar entre sí las **Figuras 3a-f**. Las TT se presentan estacionalmente en periodos de 5 meses o más, con máximos cerca de los meses intermedios de la temporada ciclónica (agosto-septiembre). Los H y GH son más frecuentes en septiembre (**Figura 3a-f**), excepto para el periodo 2006-2015. Se destaca que a partir de 1996, la frecuencia de GH aumenta al final de la temporada lluviosa (noviembre) en la región (**Figura 3d-f**). En las **Figuras 2 y 3** no se observa un patrón de distribución estacional que pueda ser asociado al calentamiento oceánico global medido, sin embargo, resulta de interés

para futuras investigaciones la presencia de un mayor número de CT a final de la temporada lluviosa en el MC. ¿Es esto indicativo de que puede esperarse un mayor número de GH a finales de año, si se considera un mayor calentamiento del AN con respecto al Atlántico sur? Aunque esta pregunta no pueden responderse en este momento, hay alguna evidencia de que regiones del Hemisferio Norte (por ejemplo, el Ártico), se están calentando más rápido que otras regiones del mundo (<https://council.science/es/current/blog/climate-explained-why-is-the-arctic-warming-faster-than-other-parts-of-the-world/>). Esta

diferencia no podría ser atribuida únicamente al calentamiento global presente, más bien, existe la posibilidad de que sea parte de una variabilidad interna natural del SCT. Estas condiciones térmicas diferentes entre ambos hemisferios no han sido reproducidas, hasta el momento, por medio de modelos numéricos acoplados que incluyen casi todas las componentes del SCT (<https://www.agenciasinc.es/Noticias/Las-temperaturas-de-los-hemisferios-norte-y-sur-han-diferido-de-forma-notable-en-los-ultimos-1.000-anos>, Neukom *et al.*, 2014).

Al analizar el número total de CT para las dos cuencas cercanas a Centroamérica (**Figura 4**, PTE en verde y MC en lila), se nota que hay un periodo histórico (circa, 1966–1994), a partir del cual, hay una notable disminución de

estos sistemas en el MC para el lapso posterior (aproximadamente, 1995-2023). Para investigar cuál de las categorías de CT, es la que más contribuye a esa aparente disminución de CT, se calculan las tendencias en el lapso estudiado (**Figura 5a-c**). Como se observa en la **Figura 5b**, solo el número de DT ha disminuido de manera estadísticamente significativa si se usa la prueba de Mann-Kendall, al 99 % de significancia. Las otras categorías no muestran una tendencia que pueda estar asociada a un calentamiento global del océano. Los CT en el PTE, en ninguna de sus categorías, presenta una tendencia significativa robusta, usando la prueba anterior con el mismo nivel de significancia. Para el AN, solamente los GH tienen una tendencia significativa (**Figura 5c**), coherente con un calentamiento oceánico

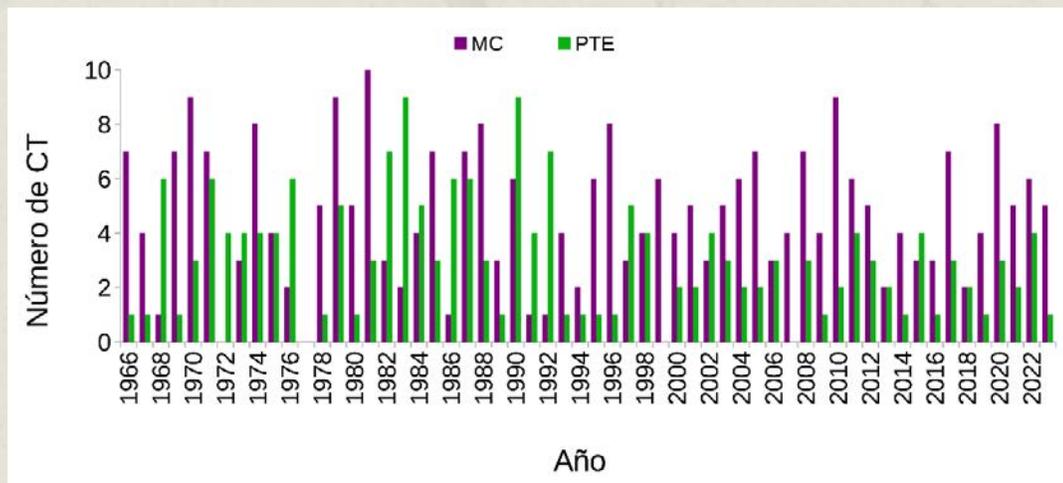


Figura 4: Total de ciclones tropicales en el mar Caribe (MC, lila) y en el Pacífico tropical del este (PTE, verde) para el periodo 1966-2023. Fuentes: Hurricane Database Second Generation (HURDAT2), National Hurricane Center (NHC) y Central Pacific Hurricane Center (CPHC). Fuentes: Hurricane Database Second Generation (HURDAT2), National Hurricane Center (NHC) y Central Pacific Hurricane Center (CPHC).

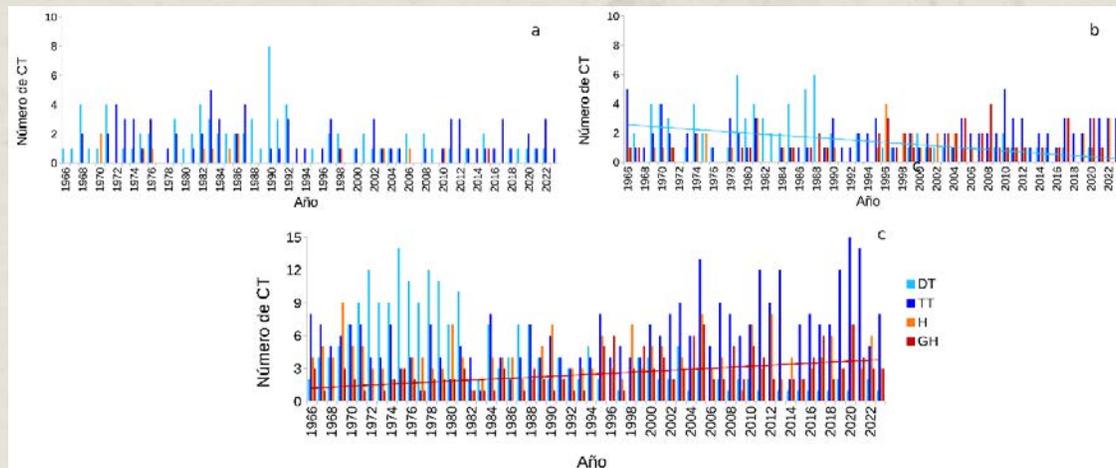


Figura 5. Totales por año de depresiones tropicales (DT, celeste), tormentas tropicales (TT, azul), huracanes (H, rosado) y grandes huracanes (GH, rojo), según la escala de Saffir-Simpson para las regiones oceánicas del a) Pacífico tropical del este, b) mar Caribe y c) Atlántico norte. Fuentes: Hurricane Database Second Generation (HURDAT2), National Hurricane Center (NHC) y Central Pacific Hurricane Center (CPHC). Fuentes: Hurricane Database Second Generation (HURDAT2), National Hurricane Center (NHC) y Central Pacific Hurricane Center (CPHC). Ver texto para definiciones.

global. Se destaca de los resultados obtenidos la disminución de DT en el MC y el aumento de GH en el AN, lo que parece ser coherente con el proyectado cambio hacia los polos de la ciclogénesis tropical, bajo un contexto de cambio climático (Cao *et al.*, 2024) en el modelo MRI-AGCM3.2H (Mizuta *et al.* 2019).

Referencias

- Amador, J. A. (2011). Socio-economic impacts associated with meteorological systems and tropical cyclones in Central América. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 92(6), S184. https://journals.ametsoc.org/downloadpdf/view/journals/bams/92/6/1520-0477-92_6_s1.pdf
- Amador, J. A., & Alfaro, E. J. (2014). Weather and climate socio-economic impacts in Central America for the management and protection of world heritage sites and the Diquis Delta culture in Costa Rica (a case study). *Advances in Geosciences*, 35, 157-167. https://www.kerwa.ucr.ac.cr/bitstream/handle/10669/13484/2014_1.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Amador, J. A., Rivera, E. R., Durán-Quesada, A. M., Mora, G., Sáenz, F., Calderón, B., & Mora, N. (2016). The easternmost tropical Pacific. Part I: A climate review. *International Journal of Tropical Biology*, 64(Suppl. 1), S1-S22. <https://doi.org/10.15517/rbt.v64i1.23407>
- Amador, J. A., Durán-Quesada, A. M., Rivera, E. R., Mora, G., Sáenz, F., Calderón, B., & Mora, N. (2016). The easternmost tropical Pacific. Part II: Seasonal and intraseasonal modes of atmospheric variability. *International Journal of Tropical Biology*, 64(Suppl. 1), S3-S57. <https://doi.org/10.15517/rbt.v64i1.23409>
- Amador, J. A., Hidalgo, H. G., Alfaro, E. J., Calderón, B., & Mora, N. (2018). Central America. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 99(8), S199-S200. <https://kerwa.ucr.ac.cr/bitstream/handle/10669/85453/Amadoreta12018BAMS.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

- Bardan, R. (2023). El análisis de la NASA confirma que 2023 fue el año más cálido registrado. *NASA*. <https://www.nasa.gov/news-release/el-analisis-de-la-nasa-confirma-que-2023-fue-el-ano-mas-calido-registrado/#:~:text=Las%20temperaturas%20globales%20del%20a%C3%B1o,de%20la%20NASA%20en%20Nueva>
- Boretti, A. (2024). Reassessing the cooling that followed the 1991 volcanic eruption of Mt. Pinatubo. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 106187. https://ui.adsabs.harvard.edu/link_gateway/2024JASTP.25606187B/doi:10.1016/j.jastp.2024.106187
- Cao, X., Watanabe, M., Wu, R., Chen, W., Sun, Y., Yan, Q., Wang, P., Deng, D., & Wu, L. (2024). The projected poleward shift of tropical cyclogenesis at a global scale under climate change in MRI-AGCM3. 2H. *Geophysical Research Letters*, 51(3), e2023GL107189. <https://doi.org/10.1029/2023GL107189>
- Deng, W. (2024). Ocean warming and warning. *Nature Climate Change*, 14(2), 118-119. <https://doi.org/10.1038/s41558-023-01921-z>
- Jackson, R. (2020). Eunice Foote, John Tyndall and a question of priority. *Notes and Records*, 74(1), 105-118. <https://doi.org/10.1098/rsnr.2018.0066>
- Landsea, C. W., & Franklin, J. L. (2013). Atlantic Hurricane Database Uncertainty and Presentation of a New Database Format. *Monthly Weather Review*, 141(10), 3576-3592. <https://doi.org/10.1098/rsnr.2018.0066>
- Maldonado, T., Amador, J. A., Rivera, E. R., Hidalgo, H. G., & Alfaro, E. J. (2020). Examination of WRF-ARW Experiments Using Different Planetary Boundary Layer Parameterizations to Study the Rapid Intensification and Trajectory of Hurricane Otto (2016). *Atmosphere*, 11(12), 1317. <https://doi.org/10.3390/atmos11121317>
- Mizuta, R., Yoshimura, H., Ose, T., Hosaka, M., & Yukimoto, S. (2019). MRI MRI-AGCM3-2-H model output prepared for CMIP6 HighResMIP. Version 20200619. Earth System Grid Federation. <https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.10942>
- NASA. (2024). Signos vitales. Cambio Climático Global. <https://climate.nasa.gov/en-espanol/signos-vitales/calentamiento-del-oceano/#:~:text=El%20noventa%20por%20ciento%20del,muestra%20en%20el%20gr%C3%A1fico%20superior.>
- Neukom, R., Gergis, J., Karoly, D. J., Wanner, H., Curran, M., Elbert, J., González-Rouco, F., Linsley, B. K., Moy, A. D., Mundo, I., Raible, C., Steig, E. J., van Ommen, T., Vance, T., Villalba, R., Zinke, J., & Frank, D. (2014). Inter-hemispheric temperature variability over the past millennium. *Nature Climate Change*, 4(5), 362-367. <https://doi.org/10.1038/nclimate2174>
- RMS (Royal Meteorological Society). (2024). What is meant by climate change? <https://www.metlink.org/resource/climate-change-2/>
- Shapiro, M. (August 23rd, 2021). Eunice Newton Foote's nearly forgotten discovery. *Physics Today*, 23 August 2021. <https://pubs.aip.org/physicstoday/online/30361>
- Sorenson, R. P. (2011). Eunice Foote's pioneering research on CO2 and climate warming. *Search and Discovery*, 70092. https://www.searchanddiscovery.com/documents/2018/70317sorenson/ndx_sorenson.pdf
- Storto, A., & Yang, C. (2024). Acceleration of ocean warming from 1961 to 2022 unveiled by large-ensemble reanalyses. *Nature Communications*, 15(1), 545. <https://doi.org/10.1038/s41467-024-44749-7>
- Taylor, H. T., Ward, B., Willis, M., & Zaleski, W. (2010). *The Saffir-Simpson hurricane wind scale*. National Hurricane Center and Central Pacific Hurricane Center. <https://www.nhc.noaa.gov/about-shws.php>
- Terry, J. P., Goff, J., Winspear, N., Bongolan, V. P., & Fisher, S. (2022). Tonga volcanic eruption and tsunami, January 2022: Globally the most significant opportunity to observe an explosive and tsunamigenic submarine eruption since AD 1883 Krakatau. *Geoscience Letters*, 9(1), 24. <https://doi.org/10.1186/s40562-022-00232-z>