

Respuestas de las precipitaciones en Venezuela al actual calentamiento sin precedentes de las aguas oceánicas globales

Dirk R. Thielen^{1*}, Mary L. Puche¹, Paolo Ramoni-Perazzi^{2,3}, José I. Quintero¹,

Guillermo Bianchi⁴, Ezequiel Zamora Ledezma⁵, Alberto Quintero^{6,7}, Marco Marquez¹, Wilmer Rojas¹

¹ Laboratorio de Ecología del Paisaje y Clima, Instituto Venezolano de Investigaciones Científicas (IVIC), Caracas, 1020A, Venezuela

² Progetto ManGrowth della Cooperazione Italiana (Sapienza – Eduardo Mondlane), Maputo, Mozambique

³ Centro de Simulación y Modelos (CESIMO), Universidad de Los Andes, Mérida, 5101, Venezuela

⁴ Laboratorio de Ecología de Insectos, Departamento de Biología, Universidad de Los Andes, Mérida, 5101, Venezuela

⁵ 5GRUPO-FCA-FAGROCLIM, Facultad de Ingeniería Agrícola, Universidad Técnica de Manabí (UTM), Lohana 13132, Ecuador

⁶ Instituto de Biodiversidad, Conservación y Manejo de Recursos Naturales, Universidad Nacional Experimental de Los Llanos “Ezequiel Zamora” (UNELLEZ), Barinas, Venezuela

⁷ Centro de Biotecnología Agrícola, Instituto Venezolano de Investigaciones Científicas (IVIC), Caracas, 1020A, Venezuela

Corresponding author: Dirk R. Thielen, dirkthielen@gmail.com

(Recibido: 03-05-2024. Publicado: 21-06-2024.)

DOI: 10.59427/rcli/2024/v24.22-43

Resumen

Se trata del primer estudio que aborda la problemática generada por la actual ocurrencia de un calentamiento oceánico generalizado sin precedentes, a una velocidad e intensidad no prevista en ninguno de los modelos preexistentes, con capacidad probada de afectar, significativamente y en el término de pocos meses, las precipitaciones en gran parte del territorio de Venezuela y la región. La investigación aporta información sobre los siguientes aspectos medulares, relacionados a esta problemática: 1- La evolución y dinámica de los eventos climáticos extremos en Venezuela, 2- Su origen y factores determinantes, y 3- Pronósticos confiables basados en determinantes identificados y tendencias actuales. Los resultados señalan que más del 25% de las precipitaciones en Venezuela están asociadas a la ocurrencia de eventos extremos, donde, calentamientos de las aguas del Mar Caribe y del Atlántico norte tropical han generado los principales y más intensos pulsos húmedos históricos en vastas regiones de Venezuela, así como las principales sequías son mejor explicadas por la ocurrencia de eventos “Niño Atlántico”, en lugar de El Niño global (la fase cálida de ENOS). Hasta tanto no se revierta el calentamiento oceánico generalizado actual, en Venezuela, los pulsos de sequía extrema, espacial y temporalmente extensos, generados principalmente por una condición Niño Atlántico casi permanente, serán fenómenos climáticos recurrentes que alternarán con aquellos pulsos húmedos extremos, generados por el simultáneo calentamiento de las aguas del Mar Caribe y el Atlántico norte tropical. Los pulsos húmedos, si bien extremos, serían a su vez breves, vinculables a una exacerbación de la actividad ciclónica anual resultado de la persistencia de aguas cálidas en esta sección de la cuenca atlántica.

Palabras Claves: Calentamiento oceánico, Cambio climático abrupto, Niño Atlántico, Eventos extremos de precipitación, Temperatura superficial oceánica, Venezuela.

Abstract

This is the first study that addresses the problem generated by the current occurrence of unprecedented widespread ocean warming, at a speed and intensity not foreseen in any of the pre-existing models, with proven capacity to affect, significantly and within a few months, precipitations in much of the territory of Venezuela and the region. Relative to this problem, the research provides information on the following core aspects: 1- The evolution and dynamics of extreme climate events in Venezuela, 2- Their origin and determining factors, and 3- Reliable forecasts based on identified determinants and current trends. The results indicate that more than 25% of precipitation in Venezuela is associated with the occurrence of extreme events. Where, sea surface water warming of the Caribbean and the tropical North Atlantic have generated the main and most intense historical humid pulses. As for the main droughts, these are better explained by the occurrence of "Niño Atlántico" events, instead of global El Niño (the warm phase of ENSO). Until the current widespread oceanic warming is reversed, in Venezuela, the spatially and temporally extensive pulses of extreme drought, generated mainly by a quasi-permanent Atlantic Niño condition, will be recurrent climatic phenomena that will alternate with those extreme humid pulses, generated by the simultaneous warming of the waters of the Caribbean Sea and the tropical North Atlantic. The humid pulses, although extreme, would in turn be brief, linked to an exacerbation of yearly cyclonic activity resulting from the persistence of warm waters in this section of the Atlantic basin.

Keywords: Ocean warming, Abrupt climate change, Atlantic Niño, Extreme precipitation events, Sea surface temperature, Venezuela.

1 Introducción

Junto con la expansión de las actividades antrópicas, el cambio climático representa una gran amenaza para Venezuela y para la región. Al alterar la dinámica espacial y temporal histórica de las precipitaciones, el cambio climático puede causar perturbaciones significativas en el funcionamiento y resiliencia de muchos sistemas naturales, así como amplificar y empeorar las interacciones humanas con su entorno, comprometiendo severamente la sostenibilidad en el desarrollo de sus actividades. Los modelos climáticos predictivos actuales indican un aumento progresivo en la frecuencia de eventos extremos (por ejemplo, lluvias extremas y sequías prolongadas, Thielen et al. 2020, 2021a y b, 2023). Relativo a esta problemática, el IPCC (2021) resalta en su último informe (el AR6) la velocidad sin precedentes con la que el sistema climático en su conjunto está respondiendo a la inequívoca influencia humana, generando eventos climáticos no solo extremos, sino también abruptos, en todas las regiones del mundo, a una velocidad no prevista en ninguno de los modelos preexistentes, ni siquiera en los del propio IPCC. Se trata de una realidad climática excepcionalmente nueva. El actual calentamiento oceánico sin precedentes es reflejo de esta realidad.

La temperatura del mar es una variable clave en el sistema climático global que regula las interacciones térmicas y dinámicas entre el océano y la atmósfera. Al cubrir dos tercios de la superficie del planeta, la mayor parte de la energía del sol, que impulsa todo el sistema climático, va primero a los océanos (Archer y Rahmstorf, 2010). Los océanos almacenan aproximadamente 93% de este calor (Reid, 2016), lo distribuye por el planeta a través de las corrientes oceánicas y finalmente lo liberan a la atmósfera (Rahmstorf y Richardson, 2007). Por lo tanto, los océanos proporcionan un control clave sobre cómo la energía solar ingresa e impulsa el sistema climático. La gran capacidad de los océanos para almacenar calor proporciona un efecto amortiguador que reduce las variaciones del clima. Este efecto amortiguador de los océanos había logrado reducir el calentamiento (atmosférico) global observado, hasta ahora (Rahmstorf, 2024). Según registros del Copernicus Climate Change Service (C3S, 2024), desde el 13 de marzo 2023 y hasta el presente, la temperatura oceánica global ha estado constantemente muy por encima de la media histórica. El año 2023, la temperatura oceánica global media fue de 20,80°C, con un máximo histórico de 21,02°C durante dos días consecutivos. Ahora bien, tan solo en su primer trimestre, el año 2024 ya presenta una media de 21,04°C, producto de un pulso de más de 60 días continuos con temperaturas iguales y superiores al máximo histórico de 2023. Sin dudas, las mediciones oceánicas muestran que los océanos se están calentando. Si bien este calentamiento es más evidente en aguas superficiales del océano, existe también una tendencia muy significativa a la profundización de este calentamiento (Rahmstorf, 2024). En el 2023, la temperatura superficial del mar y el contenido de calor del océano a profundidades de 2000 m alcanzaron niveles récord (Cheng et al., 2024).

Producto de esta profundización, existe una posibilidad que el calentamiento se torne como una condición permanente para grandes extensiones oceánicas (Oliver et al., 2021; Zhang et al., 2022b). Aún más allá, las evidencias señalan que el actual calentamiento puede generar, en el muy corto plazo, transgresiones en puntos de inflexión climáticos especialmente críticos (Ditlevsen y Ditlevsen, 2023) - en la circulación de vuelco meridional del Atlántico (AMOC, por sus siglas en inglés), por ejemplo (Rahmstorf, 2024). El último informe del IPCC advierte que, más allá de 1,5°C de calentamiento (atmosférico) global, se está en la zona de "alto riesgo" con respecto a los puntos de inflexión climáticos incluidos los de origen oceánico (IPCC, 2021). Rahmstorf (2024) afirma que el actual calentamiento oceánico sin precedentes es un claro indicio del debilitamiento y potencial colapso de la AMOC. La AMOC es parte de la circulación termohalina global y es considerada como uno de los "elementos de inflexión"

potenciales más delicados en la Tierra, con capacidad de generar cambios rápidos o colapsos en el comportamiento típico del clima. Un colapso total de AMOC sería un desastre abrupto, masivo e irreversible a escala planetaria, generando cambios dramáticos e inmediatos en el clima global (Lenton et al., 2023). Su activación dañaría gravemente los sistemas de soporte vital de nuestro planeta y amenazaría la estabilidad de nuestras sociedades, razón por la cual, el calentamiento oceánico actual y el estado real de la AMOC están siendo evaluados activamente por la comunidad científica internacional (Rahmstorf, 2024). El calentamiento oceánico actual intensifica aún más el ciclo global del agua, a través de alteraciones al régimen de precipitaciones y la gravedad de los eventos húmedos y secos. Se espera que los problemas de sequía afecten a una parte cada vez mayor de la superficie terrestre. El riesgo de inundaciones aumentará en muchas regiones; paradójicamente, incluso en zonas también afectadas por la sequía (Archer y Rahmstorf, 2010). Venezuela, así como el resto de la región, está expuesta a esta redefinición climática que está generando el actual calentamiento oceánico sin precedentes (Thielen et al., 2020, 2021a y b, 2023). Los mecanismos exactos sobre cómo la temperatura superficial del mar puede influir en la precipitación a nivel local siguen siendo inciertos (Mechoso et al., 2005), y no se considerarán en este estudio.

Históricamente, dos factores fundamentales han determinado el clima de Venezuela: 1) Los vientos alisios que soplan de dirección noreste a suroeste, desplazando masas de aire húmedo desde el océano Atlántico hacia el continente, y 2) El paso anual del sol, el cual afecta la circulación atmosférica general y la activación de la Zona de Convergencia Intertropical (Goldbrunner, 1976). Según Huber y Oliveira-Miranda (2010), la presencia de grandes sistemas de montañas y extensas llanuras en Venezuela también producen efectos importantes sobre la distribución no sólo estacional, sino también variaciones regionales y locales de las lluvias. La media anual de las precipitaciones oscila entre 360 y 4.300 mm, distribuida unimodal o bimodalmente (Goldbrunner, 1976). La estacionalidad de las precipitaciones en Venezuela puede ser muy marcada, como es el caso de las extensas llanuras, o bastante difusa, como en las selvas pluviales. En el nivel nacional, estas características climáticas y su dinámica histórica han representado un papel fundamental en el diseño de prácticas y manejos orientados al logro de la seguridad alimentaria, de la seguridad sanitaria, de la seguridad energética (hidroeléctrica) y de la seguridad ambiental en general (Guenni et al., 2008). Sin dudas, la redefinición climática que está generando el actual calentamiento oceánico sin precedentes obligará, sobre la marcha y en un lapso muy perentorio, a reorientar y hasta replantearse muchas de estas prácticas históricas.

En relación con esta problemática, la prioridad actual ya no es solo la demostrar cuán efectivos somos pronosticando el clima que enfrentarán las venideras generaciones, sino también la de prever, sobre la marcha, los efectos de cambios climáticos que ya están sucediendo y afectan nuestra propia generación. Esta nueva realidad climática de extremos tiene, sin dudas, capacidad de afectar severamente y en tiempo real la sostenibilidad de nuestro desarrollo, así como la conservación y el funcionamiento de nuestro entorno, por lo que urge su estudio en los siguientes aspectos medulares: 1- La evolución y dinámica de los eventos climáticos extremos, 2- Su origen y factores determinantes, y 3- Pronósticos confiables basados en determinantes identificados y tendencias actuales. A través de la aplicación de sofisticadas herramientas de análisis espacio-temporal, del uso y análisis de las bases de datos climáticas y ambientales más amplias y actualizadas disponibles, en atención a la variabilidad espacial y la diversidad geográfica característica, la presente investigación genera información confiable y de elevado valor estratégico relativa al estado actual y futuro de las precipitaciones en Venezuela, en el contexto de las últimas evidencias y tendencias climáticas globales, con especial atención al actual calentamiento oceánico sin precedentes.

2 Metodología

2.1 Área de Estudio

El área de estudio incluye las ocho principales regiones o sistemas naturales presentes en Venezuela (Huber y Oliveira-Miranda, 2010), a saber: Lago de Maracaibo, Sistema Coriano, Los Andes, Los Llanos, Cordillera Central, Cordillera Oriental, Sur del Orinoco y Sistema Deltaico, así como se incluye el Territorio Esequibo (Figura 1). Las principales características de cada una de estas regiones están resumidas en la Tabla 1.



Figure 1: Mapa del área de estudio, el cual incluye las ocho principales regiones naturales presentes en Venezuela (Huber y Oliveira-Miranda, 2010), así como el Territorio Esequibo.

Table 1: Principales características de cada una de las regiones consideradas en la presente investigación.

Región	Extensión	Estados	Población	Relevancia
Lago de Maracaibo	≈ 44.500 km ²	Zulia, Trujillo y Mérida	14% de la población del país [102hab/km ²]	Principal zona productora de petróleo del país, así como una elevada actividad agropecuaria.
Sistema Coriano	≈ 46.700 km ²	Falcón, Lara y Yaracuy	9% de la población del país [64 hab/km ²]	Los dos complejos refinadores de hidrocarburos más grandes de Venezuela (y de Latinoamérica) se encuentra en esta región.
Los Andes	≈ 39.300 km ²	Táchira, Mérida y Trujillo	12% de la población del país [94 hab/km ²]	Elevada actividad agrícola. Constituye una prolongación de Los Andes Colombianos y mayor cadena montañosa en Venezuela.
Los Llanos	≈ 252.700 km ²	Apure, Barinas, Portuguesa, Cojedes, Guárico, partes de Anzoátegui y Monagas	16% de la población del país [20 hab/km ²]	Elevada actividad agrícola y pecuaria, en esta región se encuentran importantes cuencas sedimentarias petrolíferas.
Cordillera Central	≈ 39.700 km ²	Aragua, Carabobo, Distrito Capital, Miranda y La Guaira	36% de la población del país [285 hab/km ²]	Presenta una extensa actividad industrial, así como grandes zonas urbanas.
Cordillera Oriental	≈ 11.200 km ²	Sucre y partes de Anzoátegui y Monagas	4% de la población del país [121 hab/km ²]	Se caracteriza por una importante actividad petrolera, principalmente de extracción.
Sur del Orinoco	≈ 438.300 km ²	Amazonas y Bolívar	6% de la población del país [5 hab/km ²]	Extensos bosques pluviales y sabanas. Posee una extensa red fluvial y una de las plantas hidroeléctricas más grandes del planeta.
Sistema Deltaico	≈ 42.400 km ²	Delta Amacuro y parte de Monagas	2% de la población del país [19 hab/km ²]	Presenta extensas zonas de bosques inundables, así como importantes reservas de hidrocarburos.
Territorio Esequibo	≈ 159.000 km ²	Acuerdo de Ginebra del 17 de febrero de 1966 y Protocolo de Puerto España del 18 de junio de 1970	[1 hab/km ²]	Casi en su totalidad está cubierta por densos bosques pluviales, además concentra una gran riqueza de especies animales.

2.2 Datos

Los datos de precipitación se obtuvieron del Climate Hazards group Infrared Precipitation with Stations (CHIRPS V2.0, <https://iridl.ldeo.columbia.edu/SOURCES/.UCSB/.CHIRPS/.v2p0/.monthly/.global/>). CHIRPS V2.0 es un conjunto de datos base mensual de lluvia rasterizados de resolución de 0,05° que abarca 50°S - 50°N, desde enero 1981 hasta el presente. Por sus características, estos datos son excelentes para el monitoreo continuo de la dinámica espacial y temporal de las lluvias, así como de los extremos de precipitación (Funk et al., 2015; Thielen et al. 2015 y 2016). Para el presente estudio, se utilizaron 516 imágenes digitales (rásteres) con información georreferenciada sobre precipitación mensual comprendidos en la serie Ene-1981 / Dic-2023.

Por otro lado, los datos mensuales de la temperatura de la superficie del mar (SST, por sus siglas en inglés) se obtuvieron del Optimum Interpolation Sea Surface Temperature (OISST) Version 2.1 de la NOAA, que es un conjunto de datos globales rasterizados disponibles a una resolución de 0,25° de latitud/longitud (http://iridl.ldeo.columbia.edu/maproom/Global/Ocean_Temp/Monthly_Temp.html). Para el presente estudio, se utilizaron datos mensuales para la serie temporal Ene-1982 / Dic-2023 de 504 rásteres. La media mensual y anual, así como algunos otros parámetros básicos de precipitación, se obtuvieron mediante aplicaciones disponibles en los sistemas de información geográfica (SIG).

2.3 Cálculo del Índice Pluviométrico Estandarizado de Sequía (SPDI) mensual

Siguiendo las recomendaciones de la Organización Mundial de Meteorología (WMO, 2016a y b), en este estudio se evaluó la dinámica espacio-temporal de las precipitaciones a través de la aplicación de un índice de anomalías, en este estudio, el Índice Estandarizado de Sequía Pluviométrica (SPDI, por sus siglas en inglés) desarrollado por Pita (2001). El SPDI es un índice de precipitación mensual que se basa en el cálculo de anomalías de precipitación mensual acumuladas, similar al conocido Índice de Precipitación Estandarizado (SPI) de McKee et al. (1993), más concretamente, el SPI de 12 meses. Al igual que en este índice, los valores que van de +1,00 a +1,50 y de +1,50 a +2,00 están asociados con episodios moderadamente húmedos y muy húmedos, respectivamente, y los valores superiores a +2,00 son representativos de episodios extremadamente húmedos (Tabla 2). Los períodos moderadamente secos, muy secos y extremadamente secos se caracterizan por los mismos rangos con signo negativo.

Tabla 2: Categorías resultantes de la estimación del SPDI, adaptadas de McKee et al. (1993).

RANGO	CATEGORÍA
≤ -2.00	<i>Extremadamente seco</i>
-1.99 - -1.50	<i>Muy seco</i>
-1.49 - -1.00	<i>Moderadamente seco</i>
-0.99 - 0.99	<i>Normal</i>
1.00 - 1.49	<i>Moderadamente húmedo</i>
1.50 - 1.99	<i>Muy húmedo</i>
≥ 2.00	<i>Extremadamente húmedo</i>

El SPDI se calcula de la siguiente manera:

Primera etapa, Ec. (1):

$$APi = Pi - P_{MED} \quad (1)$$

Donde APi es la anomalía de precipitación mensual, Pi es la precipitación mensual y PMED es la precipitación mediana del mes para la serie. En cuanto a este estudio, la serie corresponde a 1981-2010.

Segunda etapa, Ec. (2):

$$APAi = \sum APi \quad \text{De } i = \text{negativo } AP \text{ a } i = \text{positivo } AP \quad (2)$$

Donde APAi es la anomalía de precipitación acumulada del mes.

Tercera etapa, Ec. (3):

$$SPDI = (APAi - \overline{APAi}) / \sigma_{APAi} \quad (3)$$

Donde \overline{APAi} es el valor promedio de las anomalías de precipitación acumuladas de todos los meses de la serie, y σ_{APAi} la desviación estándar de las anomalías de precipitación acumuladas de todos los meses de la serie. Las aplicaciones SIG permitieron implementar estas ecuaciones a los 516 rásteres CHIRPS V2.0 antes mencionados y generar productos SPDI como imágenes georreferenciadas con una resolución de 0,05°, a partir de las cuales se pudieron cuantificar valores zonales mensuales en diferentes criterios de espacio y/o tiempo. El análisis de la dinámica mensual del SPDI se realizó en la serie completa y para cada una de las regiones. La significación de la diferencia estadística entre los valores de precipitación mensual y/o SPDI para cualquier par de regiones se identificó mediante el t-Test pareada de dos colas y un $\alpha = 0,01$. Mientras que las similitudes en la dinámica espacio-temporal del SPDI entre las distintas regiones se identificaron mediante Cluster Analysis (agrupación de K-medias utilizando distancia euclidiana). Thielen et al. (2020, 2021a y b, 2023) demostraron la efectividad de este análisis cuando se trabaja con datos que expresan anomalías de precipitación en términos de SPDI (o Z-Scores).

2.4 Cálculo de la correlación de la precipitación con las SST oceánicas

Los valores medios mensuales de SST, así como las anomalías (SSTA), fueron estimados mediante aplicaciones SIG para la serie temporal Ene-1982 / Dic-2011 y para las siguientes regiones oceánicas de teleconexión: NIÑO1+2

y NIÑO3.4, en el Pacífico tropical; NP, en el norte del Océano Pacífico; NAc, en el norte del Océano Atlántico; TNA, TSA y ATL-3, en el Océano Atlántico tropical; y CARIBE, en el Mar Caribe (Figura 2). Se han identificado importantes relaciones entre las SST de estas regiones oceánicas y la precipitación media mensual en distintas regiones continentales de Sudamérica (Zhang et al., 2022a). En adición, el NIÑO 3.4 es la región oceánica utilizada para la estimación del Índice del Niño Oceánico (ONI, por sus siglas en inglés), el cual se utiliza para definir la fase e intensidad de El Niño Oscilación del Sur (ENSO). De igual manera, la región oceánica ATL-3 es utilizada como referencia para el seguimiento de otro fenómeno oceánico importante como es el Niño Atlántico (Tan et al., 2023). En este estudio, se utilizaron herramientas analíticas SIG para investigar potenciales correlaciones entre los macroíndices y las precipitaciones de las distintas regiones de Venezuela.

Específicamente, se utilizó el coeficiente de correlación de Pearson para estimar el grado de varianza explicada ($\alpha = 0,01$) entre la SST mensual y la precipitación. El análisis asumió que la SST observada precedió a la precipitación en tiempos de anticipación (lags) de 0 a 5 meses. Se utilizó un t-Test pareado de dos colas para evaluar la significación de las diferencias estadísticas. Se aplicaron pruebas de Mann-Kendall para determinar la importancia de las tendencias de las series temporales en las SST mensuales para cada zona oceánica.

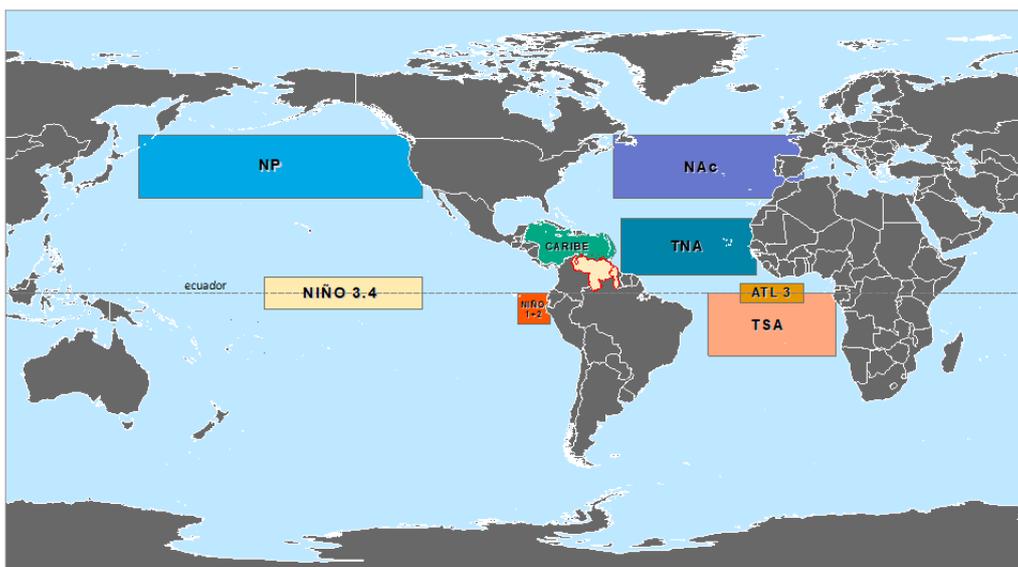


Figure 2: Regiones oceánicas consideradas en el presente estudio: NIÑO1+2 y NIÑO3.4, en el Pacífico tropical; NP, en el Pacífico norte; NAc, en el Atlántico norte; TNA, TSA y ATL-3, en el Atlántico tropical; y CARIBE, en el Mar Caribe.

3 Resultados

3.1 Precipitación

3.1.1 Distribución anual

En líneas generales, el régimen de precipitaciones a lo largo de las distintas regiones naturales de Venezuela es espacialmente variable (ver Figura 3a). Se tiene, por ejemplo, que la estacionalidad llega a ser muy marcada en Los Llanos y la Cordillera Central, y reducirse muy sensiblemente en regiones como el Sistema Deltaico y el Territorio Esequibo.

Si bien el Lago de Maracaibo, Los Andes y el Sistema Coriano son regiones naturales contiguas (Figura 1), estas presentan valores medios de precipitación significativamente distintos (1757, 1585 y 922 mm.año-1, respectivamente, Figura 3b). Desde las tierras bajas hasta las montañas más altas, la distribución anual de las precipitaciones en las regiones ubicadas en el occidente de Venezuela es característicamente bimodal - dos máximos, uno en octubre y otro en mayo; y dos mínimos, uno en enero/febrero y otro en junio/julio; o en septiembre, en el caso de Los Andes (ver Figura 3a).

Las regiones naturales de Los Llanos, Cordillera Central, Cordillera Oriental y Sur del Orinoco (1523, 1198, 1240 y 2510 mm.año-1, respectivamente, Figura 3b) presentan una estacionalidad unimodal. Esto es, una prolongada estación húmeda (≥ 6 meses duración), seguida por una estación seca cuya duración puede ser relativamente breve (< 4 meses) como en el caso del Sur del Orinoco, intermedia como es el caso de las dos cordilleras (≈ 5 meses), o alcanzar una duración importante, como es el caso de Los Llanos (≈ 6 meses). En Venezuela, las regiones que

presentan una estacionalidad unimodal, el máximo de precipitaciones suele alcanzarse en julio y el mínimo en febrero. Por último, el Sistema Deltaico y el Territorio Esequibo, con 1790 y 2098 mm.año⁻¹ respectivamente, presentan elevados niveles de precipitación a lo largo del año. Los máximos de precipitación tienden a ocurrir entre junio/agosto, en el caso del Delta, y entre mayo/julio, para el Esequibo. Esto genera una estación seca muy breve (≤ 2 meses), principalmente en febrero, resultando en las regiones con la menor estacionalidad.

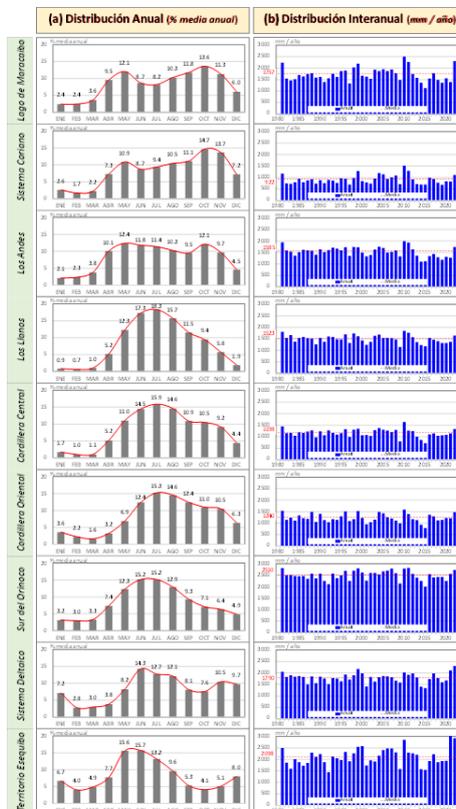


Figure 3: (a) Distribución anual y (b) Distribución interanual y valor medio (en rojo) para la serie 1981-2010 en las ocho regiones naturales consideradas en el presente estudio, a saber: Lago de Maracaibo, Sistema Coriano, Los Andes, Los Llanos, Cordillera Central, Cordillera Oriental, Sur del Orinoco y Sistema Deltaico; así como en el Territorio Esequibo (ver Fig. 1).

3.1.2 Distribución interanual

Para las regiones de Lago de Maracaibo, Sistema Coriano, Los Andes, Cordillera Central y Cordillera Oriental, durante la serie Ene-1981 / Dic-2023, los años secos fueron más frecuentes que los años húmedos, mientras que lo contrario ocurrió en el Sistema Deltaico (ver Figura 3b). En el caso de Los Llanos, Sur del Orinoco y Territorio Esequibo, los eventos secos y húmedos presentaron igual frecuencia. Se tiene que, para la mayoría de las regiones, los años húmedos ocurrieron de manera aislada o bien en pulsos breves de un par de años. Mientras que, los años secos, estos ocurrieron asociados a pulsos de duración variable. El año 2010 representó un punto de inflexión muy importante en las precipitaciones medias anuales, constituyéndose el inicio de un pulso seco generalizado que se extendería hasta diez años en la mayor parte del territorio venezolano. Para los 43 años de la serie 1981-2023, ninguna de las regiones naturales consideradas mostró una tendencia significativa a un incremento o reducción en las precipitaciones medias anuales. Si bien Los Llanos y Los Andes mostraron una reducción significativa ($P < 0.01$) en las precipitaciones medias del mes de agosto (serie 1981-2023), dicha reducción no fue suficiente para afectar el valor de sus medias anuales.

3.1.3 Anomalías de precipitación mensual - Índice Pluviométrico Estandarizado de Sequía (SPDI)

En líneas generales, para la totalidad de las regiones consideradas, el 27,5% de los meses presentaron anomalías, positivas o negativas (ie. $SPDI < -1,00$ ó $> 1,00$), que variaron entre moderadas y extremas. En relación a las anomalías positivas, estas involucraron el 10,0% de los 516 meses de la serie. Donde, el 6,8% estaban asociados a eventos moderadamente húmedos ($SPDI > 1,00 - \leq 1,50$), el 2,2% a eventos muy húmedos ($SPDI > 1,50 - \leq 2,00$) y el 1,0% a eventos extremadamente húmedos ($SPDI \geq 2,00$). Para la totalidad de las regiones consideradas, las anomalías positivas estaban comprendidas en pulsos cuya duración e intensidad eran más discretos que aquella

de los pulsos secos. Con 17,5%, las anomalías negativas fueron más frecuentes, donde el 4,9% de los meses presentaron una condición extremadamente seca ($SPDI \leq -2,00$), el 5,0% muy seca ($SPDI > -2,00 - \leq 1,50$) y el 7,7% moderadamente seca ($SPDI > -1,50 - < -1,00$). Por lo general, las anomalías negativas estaban asociados a pulsos secos muy importantes, con una duración que podía extenderse hasta por varios años.

Al respecto, la Figura 4 muestra la dinámica espacial de las precipitaciones en las distintas regiones para la serie temporal 1981-2023, expresada como cobertura relativa de las distintas categorías de anomalía (de SPDI), así como el dendrograma resultante del clúster análisis (K-medias usando la distancia Euclidiana) aplicado a dicha dinámica y a cada una de las regiones naturales. Se tiene, por ejemplo, un primer grupo de tres regiones que comparten similitudes en la dinámica temporal de las anomalías de sus precipitaciones, a saber: Los Llanos, Los Andes y la Cordillera Central (Figura 4). Acá, al principio de la serie, ocurrió un pulso húmedo importante, temporalmente extenso en las tierras bajas de Los Llanos (21 meses) y relativamente breve (3 meses) en las dos regiones montañosas del grupo. Se trató de un pulso extremadamente húmedo ($SPDI \geq 2,00$) afectando, con esta condición, más del 90% del territorio de las regiones involucradas. Posterior a este pulso y por espacio de un par de décadas, la variabilidad de las precipitaciones observada en estas tres regiones no fue suficiente para generar anomalías de importancia, ni por su intensidad ni por su dominancia espacial ($SPDI \geq -1,00 - \leq 1,00$). A principios de la década de 2000's, así como a finales de ésta, se presentaron dos pulsos secos moderados afectando entre el 20 y el 30% del territorio de las regiones. A partir de 2010 y por varios meses, estos pulsos secos fueron interrumpidos por un importante pulso húmedo afectando más de la mitad de Los Andes y de la Cordillera Central, y en menor grado a Los Llanos, con condiciones extremadamente húmedas. Es a partir de 2015 cuando se inicia en las tres regiones un pulso extremadamente seco ($SPDI \leq -2,00$) y muy extenso que ha persistido, ininterrumpidamente, hasta finales de 2023. La condición de extrema sequía ha persistido en casi el 70% de Los Llanos y de Los Andes y en casi la totalidad del territorio de la Cordillera Central.

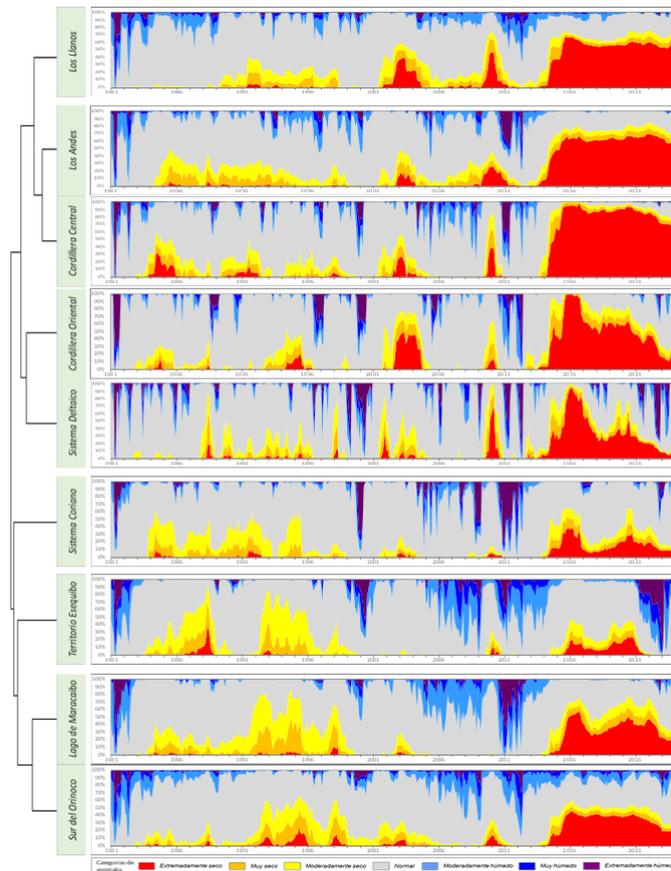


Figure 4: Dinámica espacial de las precipitaciones en las distintas regiones para la serie temporal 1981-2023, expresada como cobertura relativa de las distintas categorías de anomalía (de SPDI). El dendrograma a la izquierda se refiere a los grupos resultantes del clúster análisis (K-medias usando la distancia Euclidiana) aplicado a la dinámica temporal del SPDI. Categorías de anomalía según Tabla 2.

Asociado al clúster anterior, se tiene el grupo conformado por las regiones Cordillera Oriental y Sistema Deltaico (ver Figura 4). Si bien más intenso y breve, el inicio de la serie fue afectado también por el pulso húmedo referido para el clúster anterior: Por espacio de 3-6 meses, casi el 100% de la extensión de estas regiones, fue afectada por condiciones extremadamente húmedas ($SPID \geq 2,00$). Durante los próximos 20 años de la serie, la variabilidad

de las precipitaciones en estas dos regiones logró generar algunos pulsos húmedos intensos ($SPDI \geq 1,50$) y breves (6-8 meses), destacándose los ocurridos entre 1999/2000 y luego entre 2011/2012 con una afectación espacial hasta del 80% de sus territorios. Los dos pulsos secos de principios y finales de la década de 2000's también fueron evidentes en estas dos regiones del oriente de Venezuela. La ocurrencia de un pulso seco a finales de la serie también fue característico de este grupo, pero con las siguientes diferencias: 1- Ocurrió con varios meses de antelación, 2- Su intensificación fue más abrupta que la de otras regiones, 3- Presentó en dos máximos, siendo el primero el más intenso y extenso, afectando casi el 100% de sus territorios, y 4- La culminación del pulso seco ocurre también con antelación en este grupo, dando la oportunidad, no solo de lograr alcanzar la condición normal ($SPDI \geq -1,00 - \leq 1,00$), sino de la ocurrencia de un importante pulso húmedo ($SPDI \geq 1,50$; 14 meses), como es el caso del Sistema Deltaico.

El Sistema Coriano aparece aislado de un segundo clúster grande de regiones (Figura 4). La dinámica espacial de sus precipitaciones estuvo marcada principalmente por la presencia de importantes anomalías húmedas, en su mayoría de pocos meses. Destacan los pulsos húmedos de 1981/82, de 2000/01 y del 2011/2012. En este último pulso, por espacio de más de diez meses continuos, se presentaron los valores medios más extremos ($SPDI \approx 4,00$) en toda la serie 1981-2023 y para cualquiera de las regiones consideradas. Si bien al cierre de la serie, las precipitaciones en el Sistema Coriano son normales, al igual que en el Sistema Deltaico, ocurre un primer pulso muy seco ($SPDI \leq -1,50 - \geq -1,99$) de 20 meses entre mediados de 2015 y finales de 2016, y otro de igual intensidad pero más prolongado (37 meses), entre mediados de 2019 y mediados de 2022. Referida también a la condición seca, y si bien no se generaron anomalías de importancia, desde finales de 1982 y hasta mediados de 1995 los valores de SPDI fueron mayoritariamente negativos (Figura 4).

Una condición seca extensa similar se presentó en el Territorio Esequibo. Desde mediados de 1983 y hasta principios de 1999, los valores de SPDI fueron sostenidamente negativos, generándose un pulso seco muy prolongado caracterizado por dos máximos en su intensidad. El primero, con una duración de ≈ 31 meses, logró generar anomalías extremadamente secas ($SPDI \leq -2,00$). El segundo pulso, si bien más extenso (≈ 44 meses), su intensidad varió entre moderado y muy seco ($SPDI < -1,00 - > -2,00$). Ambos pulsos constituyeron los eventos extremos secos muy importantes ocurridos en el Territorio Esequibo, llegando a afectar más del 70% de su extensión. En 1999, un pulso húmedo extremo de varios meses que compromete más del 50% del Esequibo interrumpe la condición seca dominante en esta región. Dicho pulso es seguido por otro pulso húmedo, menos intenso, pero de casi una década de duración (2005/2015), interrumpido brevemente en 2009 por un pulso seco discreto. Luego, en 2015, al igual que el resto de las regiones, pero de menor intensidad, se inició un pulso seco que logró afectar, por más de cinco años, entre el 20 y 30% del Esequibo. Por último, al igual que el Sistema Deltaico, el Territorio Esequibo cierra la serie con la ocurrencia de un importante pulso húmedo de 24 meses de duración (Ago-2021 / Jul-2023) de los cuales siete meses continuos alcanzaron una condición extremadamente húmeda ($SPDI \geq 2,00$) (Figura 4).

Si bien se encuentran geográficamente separadas, el clúster análisis mostró evidencias de que el Lago de Maracaibo y el Sur del Orinoco presentan una dinámica temporal de las anomalías de sus precipitaciones muy similar. Dicha dinámica se inicia en 1981 con un pulso húmedo que se extiende por más de dos años. Durante este pulso y por espacio de casi un año, las anomalías positivas muy fuertes afectaron más del 70% del territorio de estas dos regiones. Hasta mediados de la década de los 2000's, la condición se tornó moderada y gradualmente más seca. Desde mediados de 2005 hasta mediados de 2012, dicha condición fue interrumpida por numerosos pulsos húmedos relativamente breves, en la mayoría de los casos, de moderada intensidad. Desde finales de 2015, al igual que la mayoría de las regiones estudiadas, se inicia un pulso seco muy extenso e intenso que prevalece hasta finales de la serie (Dic-2023). En el caso del Lago de Maracaibo, durante 34 meses continuos ($SPDI \leq -2,00$, May-2020 / Sep-2022) presentó una condición extremadamente seca, afectando 30 y 50% de su territorio. En el Sur del Orinoco este pulso fue menos intenso, sólo la segunda mitad de 2020 alcanzó la condición extrema ($SPDI \leq -2,00$) en aproximadamente el 30% de este territorio sureño. Para finales de la serie (Dic-2023), tanto para el Lago de Maracaibo como para el Sur del Orinoco, la condición de sequía extrema ($SPDI \leq -2,00$) se ha restringido a menos del 20% de sus territorios (Figura 4).

3.2 Dinámica de las anomalías de la temperatura superficial del mar (SSTA)

La Figura 5 muestra la dinámica de las SSTA para la serie Ene-1982 / Dic-2023 en las diferentes regiones oceánicas (Figura 2). Se estableció que la dinámica más significativa ($P < 0,01$) resultó del calentamiento de las aguas del CARIBE ($z\text{-stat} = 6,03$), así como del océano Atlántico Norte (NAC y TNA; $z\text{-stat} 6,16$ y $5,12$, respectivamente) y del norte del océano Pacífico (NP, $z\text{-stat} = 6,00$). En términos absolutos, el SSTA resultante en estas regiones fue de 1,35 a 2,26 veces mayor que aquella de las regiones oceánicas del hemisferio sur (TSA) o de las regiones ecuatoriales del Pacífico (NIÑO 1+2 y NIÑO 3.4) o del Atlántico (ATL-3). Tanto para las cuatro regiones oceánicas nórdicas, así como en menor grado para TSA, la tendencia significativa a un incremento en sus SST fue constante para cada uno de los meses del año. En el caso de NIÑO 1+2 y NIÑO 3.4, no se evidenció ninguna tendencia significativa ($P > 0,05$), ni al incremento ni a la disminución de las SST, para ninguno de los meses del año. Mientras que para ATL-3, es durante el trimestre de Jun-Jul-Ago cuando se aprecia una tendencia significativa ($P < 0,01$) al calentamiento.

Para cualquier región oceánica, durante la serie 1982/2023, cerca del 60% de los meses presentaron anomalías positivas. A lo largo de los 42 años de esta serie, el CARIBE tuvo un incremento anual de 0,0239°C en sus SST, para TNA este fue de 0,0227°C, de 0,0246°C para NAc y de 0,0286°C para NP. Pero fue durante los últimos cinco años cuando se alcanzó el calentamiento más importante de las SST. En el caso del CARIBE, TNA, NAc y NP, el 100% de las anomalías eran positivas y de estas ≈ 20% eran superiores a 1°C. El CARIBE ha mantenido valores de SSTA positivos constantemente desde Jul-2018, con una anomalía superior a +1°C por los últimos seis meses. Para las regiones atlánticas, estas han sido como sigue: para TNA, desde May-2019 con anomalías positivas y los últimos ocho meses con temperaturas > 1°C de la media histórica; y para NAc, desde Sep-2015 (> 0,1°C) y los últimos siete meses con SSTA > 1°C. En el Pacífico, las aguas en NP han estado persistentemente caliente desde Jun-2017 y los últimos nueve meses con temperaturas > 1°C. Como resultado, el calentamiento de las SST durante los últimos cinco años de la serie 1982/2023 en estas cuatro regiones fue como sigue: en el CARIBE, fue 133% superior a la media histórica, 671% en el caso de TNA, 515% en NAc y 390% en NP. Las anomalías máximas generadas por este calentamiento equivalen a 1,58 °C en el CARIBE y en TNA, de 1,43°C en NAc, y de 1,74 °C en el Pacífico (en NP).

En relación a la región vinculada al Atlántico Sur (TSA) y al Atlántico ecuatorial (ATL-3), también presentan un incremento significativo ($P < 0,01$) en sus SST, pero a diferencia de las cuatro regiones anteriores, la dinámica de este calentamiento fue más variable. Durante los 42 años de la serie, TSA ha presentado un calentamiento total de 0,64°C y de 0,85°C en el caso de ATL-3. Si bien el calentamiento de los últimos dos meses de la serie representó un incremento de 1,68 °C para ATL-3 y de 1,32 °C para TSA, para los últimos cinco años, el calentamiento no fue significativo: tan solo de 0,0003°C/año para TSA y de 0,0047°C/año para ATL-3.

En el caso de NIÑO 1+2 y NIÑO 3.4, por tratarse el 2023 de un año Niño, tanto del tipo Costero como del tipo global, estas regiones del Pacífico ecuatorial presentaron anomalías positivas en sus SST desde marzo de ese año: de 5,18 °C para NIÑO 1+2 y de 3,18 °C para NIÑO 3.4. Para diciembre 2023, las temperaturas de estas dos regiones se encontraban en rápida remisión. Durante los 42 años de la serie 1982/2023, las regiones NIÑO 1+2 y NIÑO 3.4 presentaron un incremento total de tan solo 0,2°C en sus SST, calentamiento considerado como no significativo ($P > 0,05$). En líneas generales, para la serie 1982/2023, no se presentaron diferencias significativas ($P > 0,01$) entre la dinámica temporal de las SSTA del CARIBE y las del TNA, así como tampoco entre los pares de regiones NAc / NP, TSA / ATL-3 y NIÑO 1+2 / NIÑO 3.4.

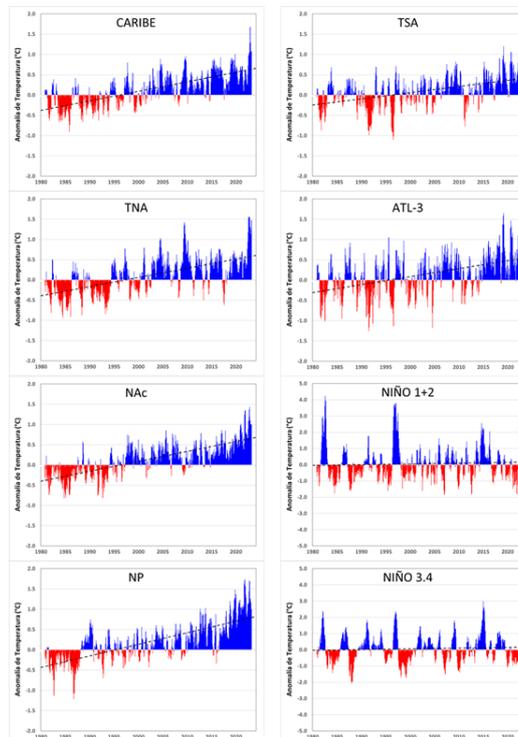


Figure 5: Dinámica de las anomalías de la temperatura superficial del mar (SSTA) y línea de tendencia para la serie enero 1982/diciembre 2023 en las diferentes regiones oceánicas (o índices macroclimáticos, ver Fig. 2).

3.3 Correlación entre la temperatura superficial del mar (SST) y la dinámica de las precipitaciones

De las Figuras 6, 7, 8 y 9 se tiene que la correlación (Pearson) que resulta entre la dinámica temporal de la temperatura superficial del mar y aquella de las precipitaciones es temporal y espacialmente diferenciable. La ecuación de la regresión lineal entre los valores mensuales de precipitación y los de SST, aportan evidencias sobre los efectos de esta correlación donde, por el calentamiento de un grado centígrado ($+1^{\circ}\text{C}$) en las aguas superficiales (SST) de las distintas regiones oceánicas, son generadas variaciones significativas en las precipitaciones en las distintas regiones naturales (Tabla 3).

El calentamiento de las aguas superficiales del CARIBE, por ejemplo, presenta la máxima correlación positiva ($r > 0,70$) con las precipitaciones de regiones como Los Llanos, la Cordillera Central y el Sur del Orinoco transcurridos entre uno y dos meses de haberse iniciado el mismo (Fig. 6). En estas regiones naturales, entre el 40 y el 83% de sus superficies son afectadas significativamente por un incremento en las precipitaciones producto de un calentamiento de las aguas del CARIBE. En el caso de la Cordillera Oriental, la máxima correlación positiva ($r > 0,70$) con las SST del CARIBE ocurre muy rápidamente (Lag 0) y en casi el 54% de su extensión. Un calentamiento de $+1^{\circ}\text{C}$ del CARIBE puede generar un incremento generalizado de las precipitaciones anuales de Venezuela, y muy especialmente en el Sur del Orinoco, en Los Llanos y en el Territorio Esequibo con respuestas de 87,5, 82,6 y 61,1 mm.año^{-1} , respectivamente (Tabla 3).

En relación a TNA, el calentamiento de las aguas en el Atlántico norte tropical genera de igual forma una correlación positiva con la dinámica de las lluvias de amplias regiones de Venezuela (Fig. 6). Con un desfase entre 1 y 3 meses, el 89% de la superficie de Los Llanos, el 66% de la Cordillera Central, el 68% de la Cordillera Oriental, el 50% del Sur del Orinoco, el 24% del Territorio Esequibo y el 14% de Los Andes responden fuertemente ($r > 0,70$), con un incremento significativo en las precipitaciones, a la presencia de anomalías cálidas en las aguas de esta región oceánica. En relación a anomalías de precipitación generada por un calentamiento de $+1^{\circ}\text{C}$ de TNA, el Sur del Orinoco y Los Llanos, con 73,7 y 67,7 mm.año^{-1} respectivamente, presentan las respuestas más importantes (Tabla 3).

Más al norte en el Atlántico, en NAc, el calentamiento de dichas aguas oceánicas genera en Venezuela una importante correlación positiva con sus precipitaciones (Fig. 7). En este caso, el incremento en las lluvias puede ocurrir entre 0 y 3 meses, con una respuesta máxima al mes de iniciado el calentamiento oceánico (Lag -1). Casi el 100% de Los Llanos, el 80% tanto de la Cordillera Central como de la Cordillera Oriental, 65% del Sur del Orinoco, 42% del Territorio Esequibo y 22% de Los Andes presentan respuestas fuertes en sus precipitaciones ($r > 0,70$) durante ese período. También con una correlación significativa positiva y fuerte ($P < 0,01$, $r > 0,70$), el calentamiento de las aguas al norte del Pacífico (NP) representa un incremento en las precipitaciones de gran parte de Venezuela. La respuesta de las precipitaciones es muy similar, en extensión e intensidad, a aquella generada por el calentamiento de las aguas oceánicas en NAc (Fig. 7). Si bien el calentamiento de $+1^{\circ}\text{C}$, tanto en NAc como en NP, generan anomalías positivas significativas generalizadas en el territorio de Venezuela, su magnitud es aproximadamente la mitad de aquella generada por aguas más próximas como aquellas del TNA (Tabla 3).

Por otro lado, el calentamiento de aguas oceánicas al sur de la línea ecuatorial, como es el caso del Atlántico Sur Tropical (TSA), se correlaciona con una reducción fuerte y significativa ($r < -0,70$, $P < 0,01$) de las precipitaciones en Venezuela (Fig. 8). Con un desfase entre 0 a 3 meses, las principales regiones naturales afectadas serían: 98% de la extensión de Los Llanos, 86% de la Cordillera Oriental, 80% de la Cordillera Central y del Lago de Maracaibo, 60% del Sur del Orinoco, 41% de Los Andes, 25% del Sistema Deltaico y 21% del Territorio Esequibo. El calentamiento de las aguas superficiales en ATL-3, una región oceánica muy próxima a la anterior (Fig. 2), genera respuestas en las precipitaciones estadísticamente similares a aquellas de TSA ($P > 0,01$), estas tienden a anticiparse por un mes (Fig. 8). El calentamiento de $+1^{\circ}\text{C}$ en estas dos regiones oceánicas genera anomalías negativas de magnitud iguales ($P > 0,01$). Donde, Los Llanos y el Sur del Orinoco, son nuevamente las dos regiones naturales con la mayor respuesta, entre 60 y 66 mm.año^{-1} (Tabla 3).

En el caso del Pacífico ecuatorial, NIÑO 1+2 es la región ENSO que presenta la correlación más significativa y fuerte ($r < -0,70$, $P < 0,01$) con las precipitaciones en Venezuela (Fig 9). El calentamiento de aguas en esta región de las costas del Pacífico sudamericano genera, con desfases entre 0 y 3 meses, reducción en las precipitaciones en el 82% de la superficie Los Llanos, 68% del Lago de Maracaibo, de la Cordillera Central y de la Cordillera Oriental, 52% del Sur del Orinoco y 21% de Los Andes. En relación al NIÑO 3,4, la dinámica de eventos El Niño y La Niña en esta región oceánica, no presenta correlación significativa, ni positiva ni negativa, con las precipitaciones del territorio de Venezuela ($P > 0,05$, $r > -0,5 < 0,5$) (Fig 9). Según la Tabla 3, a pesar de esta situación, la dinámica de las SST en las regiones NIÑO 1+2 y NIÑO 3,4 genera reducciones en las precipitaciones en toda Venezuela, especialmente en Los Llanos y en el Sur del Orinoco. Ahora bien, cuando se eliminan de la serie 1982-2023 todos los datos de SST vinculables a eventos ENSO, tanto positivos y negativos, desde los más fuertes hasta los más débiles, los efectos negativos sobre las precipitaciones de estas dos regiones naturales se incrementan significativamente. Se tiene que, en Los Llanos, la reducción por NIÑO 1+2 pasa de -34,9 a -44,1 mm.año^{-1} , mientras que para NIÑO 3,4, esta pasa de -41,0 a -118,3 mm.año^{-1} . En el caso del Sur del Orinoco, la reducción por NIÑO 1+2 pasa de -38,9 a -46,5 mm.año^{-1} , mientras que para NIÑO 3,4, esta pasa de -45,1 a

-130,2 mm.año⁻¹.

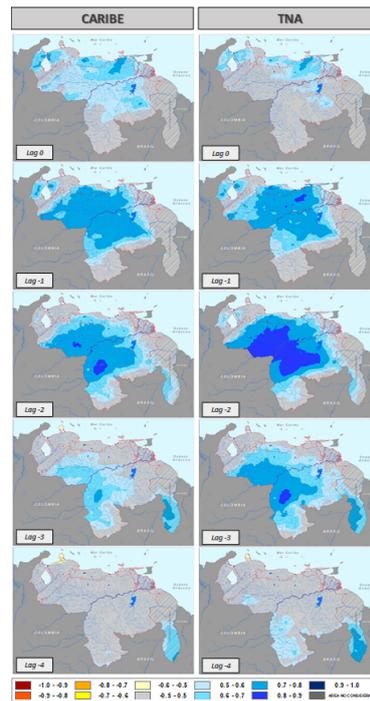


Figure 6: Correlación Pearson entre la dinámica temporal de la temperatura superficial del mar en la cuenca del Mar Caribe (CARIBE) y en el Atlántico Norte Tropical (TNA) y las precipitaciones en Venezuela (las subdivisiones están referidas a aquellas de la Fig. 1). En la representación, el Lag está referido al desfase (en meses) que existe entre la dinámica de la SST y aquella de las precipitaciones.

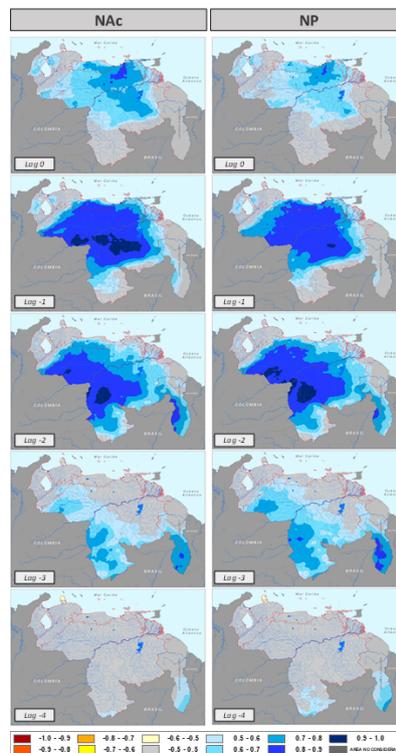


Figure 7: Correlación Pearson entre la dinámica temporal de la temperatura superficial del mar en el norte del océano Atlántico (NAc) y el norte del Pacífico (NP) y las precipitaciones en Venezuela (las subdivisiones están referidas a aquellas de la Fig. 1). En la representación, el Lag está referido al desfase (en meses) que existe entre la dinámica de la SST y aquella de las precipitaciones.

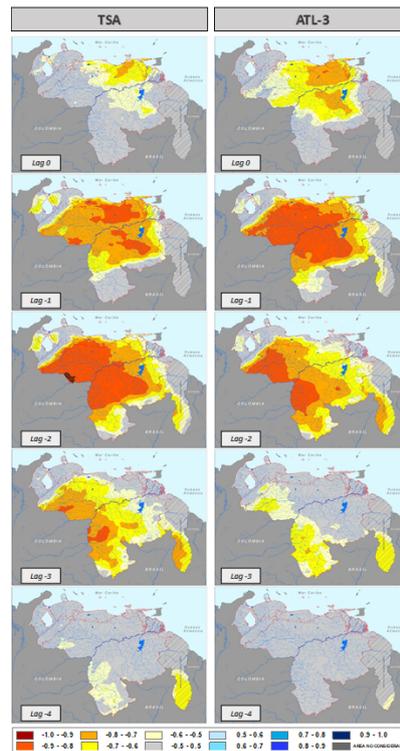


Figure 8: Correlación Pearson entre la dinámica temporal de la temperatura superficial del mar en el Atlántico Sur Tropical (TSA) y ATL-3, región del Atlántico tropical próxima a las costas africanas, y las precipitaciones en Venezuela (las subdivisiones están referidas a aquellas de la Fig. 1). En la representación, el Lag está referido al desfase (en meses) que existe entre la dinámica de la SST y aquella de las precipitaciones.

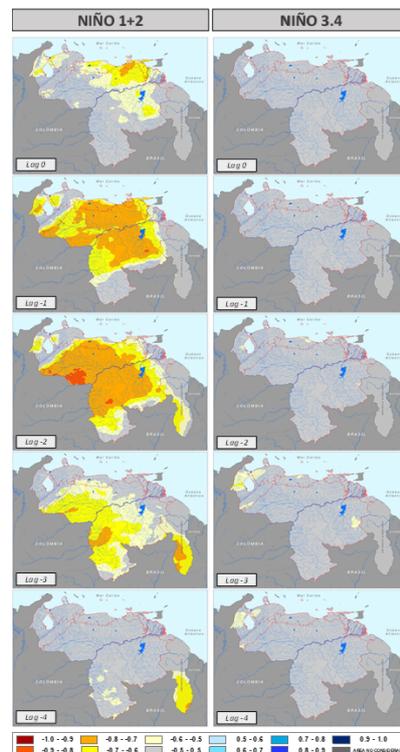


Figure 9: Correlación Pearson entre la dinámica temporal de la temperatura superficial del mar las regiones del Pacífico ecuatorial NIÑO 1+2 y NIÑO 3.4 y las precipitaciones en Venezuela (las subdivisiones están referidas a aquellas de la Fig. 1). En la representación, el Lag está referido al desfase (en meses) que existe entre la dinámica de la SST y aquella de las precipitaciones.

Tabla 3: Variación en las precipitaciones (en mm.año⁻¹) de cada región natural (ver Fig. 1) generada por el calentamiento de un grado centígrado (+1°C) en las aguas superficiales (SST) de las distintas regiones oceánicas (ver Fig. 2). Los valores corresponden, por un lado, a la pendiente de la línea de regresión entre los valores mensuales de precipitación y los de SST, y en paréntesis, a los meses transcurridos (lags) entre el calentamiento de las SST y la respuesta máxima en las precipitaciones.

	CARIBE	TNA	NAC	NP	TSA	ATL-3	NIÑO 1+2	NIÑO 3.4
<i>Los Llanos</i>	82.6 (-1)	67.7 (-2)	33.3 (-1)	28.4 (-2)	-59.9 (-2)	-59.4 (-2)	-34.9 (-2)	-41.0 (-4)
<i>Los Andes</i>	46.2 (-1)	35.2 (-1)	15.4 (-2)	13.6 (-2)	-33.5 (-2)	-33.9 (-2)	-19.2 (-2)	-29.0 (-3)
<i>Cordillera Central</i>	53.4 (-1)	43.8 (-1)	21.1 (-1)	18.2 (-1)	-38.2 (-1)	-38.7 (-1)	-23.3 (-1)	-32.0 (-3)
<i>Cordillera Oriental</i>	51.9 (0)	41.0 (-1)	19.5 (0)	16.9 (-1)	-36.0 (-1)	-34.4 (0)	-22.2 (-1)	-31.8 (-3)
<i>Sistema Deltaico</i>	42.9 (0)	31.4 (-1)	17.6 (-1)	15.4 (-1)	-33.5 (-1)	-35.9 (-1)	-19.3 (0)	-35.8 (-2)
<i>Sistema Coriano</i>	34.7 (0)	27.1 (0)	9.9 (0)	8.8 (0)	-19.1 (-1)	-15.8 (-1)	-12.9 (0)	-24.6 (-3)
<i>Territorio Esequibo</i>	61.1 (-3)	51.9 (-3)	26.4 (-2)	23.5 (-3)	-39.5 (-3)	-43.2 (-2)	-25.2 (-3)	-27.3 (-3)
<i>Lago de Maracaibo</i>	54.4 (0)	40.5 (-2)	15.1 (0)	13.2 (0)	-30.0 (-1)	-25.7 (-2)	-21.5 (-1)	-40.7 (-3)
<i>Sur del Orinoco</i>	87.5 (-3)	73.7 (-2)	37.2 (-2)	33.1 (-2)	-66.4 (-2)	-65.0 (-2)	-38.9 (-2)	-45.1 (-4)

4 Discusión

Aspectos generales sobre las precipitaciones en Venezuela El presente estudio permitió demostrar la aplicabilidad del SPDI para análisis comparativo de la dinámica temporal y espacial de las precipitaciones. Asimismo, se confirmó que CHIRPS V2.0 es una fuente valiosa de datos para el estudio de la variabilidad espacial y temporal de la precipitación base mensual en Venezuela (Paredes et al., 2016a), así como se había demostrado para otras regiones de América del Sur (Paredes et al., 2017; Thielen et al., 2020, 2021a y b, 2023).

En líneas generales, las precipitaciones son temporal y espacialmente diferenciables entre las distintas regiones naturales consideradas. Históricamente, la ocurrencia de años secos es más frecuente en aquellas regiones con fachadas hacia el Mar Caribe (eg. Lago de Maracaibo, Sistema Coriano, Cordillera Central y Cordillera Oriental). El Sistema Deltaico, por otro lado, su proximidad al océano Atlántico pareciera determinar una mayor ocurrencia de años húmedos. La continentalidad de regiones como Los Llanos, el Sur del Orinoco y el Territorio Esequibo, estaría definiendo una igualdad en la frecuencia de años secos y años húmedos. Otro determinante importante en la diferenciación espacio-temporal en la respuesta interanual entre las distintas regiones pareciera ser la estacionalidad. Dependiendo del grado de estacionalidad y de su sincronía con la estación húmeda, los efectos de las SSTA pueden ser muy importantes.

Si bien en los últimos 40 años no se ha generado un cambio climático con capacidad de afectar un cambio generalizado en las precipitaciones medias anuales en Venezuela, regiones como Los Llanos y Sur del Orinoco, caracterizadas por una marcada estacionalidad unimodal, los meses de agosto, septiembre y octubre presentan una tendencia negativa que tiende a ser significativa ($P \approx 0,05$). Es decir, en estas regiones, pudiéramos estar próximos a un escenario de un cambio de estacionalidad (ie. una salida más temprana de la estación de lluvias) y hasta en una reducción neta en la duración de la estación de lluvias. Evidencias concretas de estas tendencias para la región de Los Llanos fueron aportadas por Thielen (2003) y San José et al. (2009). Para las regiones Los Andes, Cordillera Central y Cordillera Oriental, dicha tendencia negativa ($P \approx 0,05$) es más extensa, de agosto a noviembre, lapso en el cual puede ocurrir hasta el 45% de las precipitaciones anuales en las regiones montañosas de Venezuela. Guenni et al. (2008), en un análisis de datos de 113 estaciones meteorológicas distribuidas tanto al norte como al sur del río Orinoco y comprendidos en series temporales entre 1950 y 1998, obtuvieron resultados similares a los del presente estudio. Según estos autores, la zona norte costera y la mayor parte de la región andina presentan una tendencia negativa en la precipitación, mientras que la zona sureste del estado Bolívar presenta una tendencia positiva. Sin embargo, el componente de tendencia no es significativo para la mayoría de las estaciones, agregan los autores. Por otro lado, Marteló (2012) afirma que los totales de lluvia anual y de la época lluviosa disminuyeron en casi toda Venezuela (entre 3% y 20%), siendo estadísticamente significativos en las regiones central y occidental. De hecho, en la Primera Comunicación Nacional en Cambio Climático (MARN, 2005) se pronosticó que la precipitación variaría de -5% en 2020 a -25% en 2060. El presente estudio no arroja evidencias que permitan confirmar dicho pronóstico. Las diferencias con los resultados de otros autores pueden deberse a las limitaciones espaciales y temporales que presentaban las bases de datos que fueron empleadas en sus estudios.

4.1 Sobre el origen y perspectivas de los eventos húmedos en Venezuela

En esta sección se discuten los principales resultados relativos al origen y pronóstico de eventos húmedos en las distintas regiones naturales de Venezuela. Si bien, espacialmente, NAc y NP presentan la correlación positiva más fuerte entre la dinámica de sus SST y aquella de las precipitaciones en vastas regiones de Venezuela, los efectos netos, en términos de anomalías de precipitación generadas, son inferiores a aquellas generadas por el calentamiento de aguas oceánicas superficiales más próximas como son las del CARIBE y/o las del TNA (Figs. 6 y 7 y Tabla 3). El origen de esta fuerte correlación puede deberse a una coincidencia entre la elevada estacionalidad natural de las SST de NAc y NP con aquella de las precipitaciones de regiones, también naturalmente muy estacionales, a saber: Los Llanos, Cordillera Central, Los Andes, etc. En este sentido, han sido calentamientos, relativamente abruptos y especialmente intensos, de las aguas del Mar Caribe y las del Atlántico norte tropical, los que han generado los principales y más intensos pulsos húmedos históricos en vastas regiones de Venezuela, explicando entre el 30 y el 68% de su variabilidad. La dinámica temporal de las SST de estas dos regiones oceánicas presenta una correlación positiva, significativa ($P < 0,01$) y muy fuerte con la dinámica de las precipitaciones en Los Llanos ($r \approx 0,80$), seguido por el Sur del Orinoco ($r \approx 0,75$), así como por los sistemas montañosos presentes en Venezuela de Cordillera Central ($r \approx 0,70$) y Cordillera Oriental ($r \approx 0,70$). Aunque también significativa, esta correlación pierde fuerza en las regiones más occidentales (Lago de Maracaibo, Sistema Coriano y Los Andes, $r > 0,38 < 0,40$), haciéndose aún más débil hacia oriente (Sistema Deltaico y Esequibo, $r > 0,22 < 0,35$). Al respecto y referido a la región de Los Llanos, Paredes y Guevara (2010) identificaron la influencia de las SST del Atlántico tropical en el establecimiento de condiciones atmosféricas atípicas en esa región natural específica. Glenn et al. (2015), quienes observaron una tendencia significativa a un calentamiento del CARIBE similar a las obtenidas en el presente estudio ($\approx 0,024^{\circ}\text{C}\cdot\text{año}^{-1}$), señalan que esta tendencia tiene implicaciones para los cambios de temperatura cerca de la superficie y la variabilidad de las precipitaciones, además del aumento de la actividad de los huracanes. Estudios como los de Stephenson et al. (2014) y Comarazamy et al. (2015) aportan evidencias sobre una importante correlación entre las SST del Mar Caribe y las precipitaciones regionales.

Ejemplos de pulsos húmedos importantes, en los que la elevada temperatura del Mar Caribe y del Atlántico tropical fue el principal determinante, se tiene: el pulso de 1981/82, el de 1999/00, así como el de 2010/11 (Fig. 4). La tragedia de Vargas, denominada también como el deslave de Vargas, ocurrida en diciembre de 1999 y considerada como el mayor desastre natural del que se tenga noticia en la historia de Venezuela (Andressen y Pulwarty, 2001) ocurrió, según los resultados del presente estudio, en el contexto de un pulso húmedo generado, principalmente, por calentamientos de las regiones oceánicas CARIBE y TNA. Igual origen se les atribuyen a las intensas lluvias del pulso de 2010/11, las cuales ocasionaron decenas de muertes, así como más de 130.000 desplazados, decretándose el estado de emergencia en numerosas regiones de Venezuela.

La ocurrencia de los pulsos húmedos más intensos está vinculada con calentamientos de estas dos regiones oceánicas con capacidad de generar, en el término de un año o menos, anomalías (SSTA) entre $0,5$ y $2,0^{\circ}\text{C}$. De estas, son las variaciones superiores a $1,5^{\circ}\text{C}$ las que generan las condiciones de lluvia más extremas: de $1,5^{\circ}\text{C}$ para el pulso de 1999/00 y de $2,0^{\circ}\text{C}$ para el pulso de 2010/11. A excepción de Los Llanos, el resto de las regiones naturales de Venezuela es altamente vulnerable a las condiciones extremas generadas por variaciones superiores a $1,5^{\circ}\text{C}$ en las SST del CARIBE y de TNA: hasta el 40% del territorio de Los Llanos es afectado por lluvias extremas, mientras que, para el resto, la afectación puede extenderse entre 50 y 90% de su territorio (Fig. 4). La Tabla 3 nos advierte sobre la posibilidad que, por tratarse de un valor promedio y de que los efectos de una región oceánica no necesariamente excluyen aquellos generados por otra región, las lluvias pueden llegar a ser, para cada una de las distintas regiones naturales de Venezuela, realmente extremas en un sector y época determinada (eg. La tragedia de Vargas, La tragedia de Las Tejerías, etc).

Para el momento que se escribe el presente trabajo, las SSTAs del CARIBE y de TNA son de $+1,26$ y $+1,58^{\circ}\text{C}$, respectivamente. Se trata, sin dudas, de un calentamiento sin precedentes. Aparte de la variabilidad estacional natural, no existen evidencias de que la tendencia actual a la persistencia de aguas especialmente cálidas en estas dos regiones oceánicas pueda revertirse en el corto plazo (eg. en los próximos años), existe la posibilidad real, por lo tanto, no solo de que ocurra en el corto plazo un evento de lluvias extremas como los arriba descritos, sino que se conviertan en fenómenos alarmantemente recurrentes en gran parte del territorio de Venezuela, en especial, en aquellas regiones que han demostrado una elevada sensibilidad histórica a esta condición, a saber: la Cordillera Central, la Cordillera Oriental, Los Llanos, el Sur del Orinoco y, en menor grado, Los Andes, el Territorio Esequibo, y el Lago de Maracaibo (Fig. 6).

Si bien algunos autores han referido el origen de los eventos húmedos más extremos al evento de La Niña (eg. Andressen y Pulwarty, 2001), en la Sección 4.4 se discutirá en detalle las evidencias, generadas de la presente investigación, relativas al efecto de El Niño–Oscilación del Sur (ENOS), tanto en su fase fría (La Niña) como en su fase cálida (El Niño), en la dinámica espacio-temporal de las precipitaciones en Venezuela.

4.2 Sobre el origen y perspectivas de los eventos secos en Venezuela

Dependiendo de la región natural considerada, las regiones atlánticas tropicales TSA y ATL-3 explican entre el 30 y el 80% de la variabilidad de los pulsos secos más importantes ocurridos durante la serie 1981-2023 (Fig. 4 y 8).

La dinámica temporal de las SST de estas dos regiones oceánicas presenta una correlación negativa significativa ($P < 0,01$) muy fuerte con la dinámica de las precipitaciones en Los Llanos ($r \approx -0,80$), seguido por el Sur del Orinoco ($r \approx -0,75$), así como por los sistemas montañosos presentes en Venezuela de Cordillera Central ($r \approx -0,70$), Cordillera Oriental ($r \approx -0,65$) y Los Andes ($r \approx -0,50$). Aunque también significativa, esta correlación pierde fuerza ($r > -0,30 < -0,45$) en las regiones más occidentales (Lago de Maracaibo y Sistema Coriano) y orientales (Sistema Deltaico y Esequibo).

Desde mediados de 1983 y hasta finales de 1998 se inicia un lapso persistentemente seco en la mayoría de las regiones naturales de Venezuela. El origen de esta condición fue identificado por la ocurrencia reiterada de pulsos de aguas cálidas en TSA y ATL-3, y muy especialmente en esta última región oceánica (Fig. 5). La duración de estos pulsos varió entre 9 y 21 meses, generando incrementos entre 0,08 y 0,21°C.mes⁻¹, donde la mayor anomalía fue alcanzada en el pulso de menor duración. Si bien no se identificaron diferencias significativas ($P > 0,01$) en la dinámica temporal de las SST entre TSA y ATL-3, las anomalías medias resultantes fueron significativamente diferentes (0,99 vs 1,69°C, respectivamente; $P > 0,01$). Durante cada uno de estos seis pulsos, las anomalías medias generadas en las SST del CARIBE y en TNA fueron muy discretas: 0,09 y 0,12°C, respectivamente. A partir de 1999, la variabilidad de las SST en la región ATL-3 disminuyó drásticamente, así como ocurrió una reducción generalizada, durante los próximos 15 años, en la extensión e intensidad de los eventos secos en Venezuela. Esta pausa en la presencia de aguas cálidas en el ATL-3 coincidió con la ocurrencia de pulsos húmedos extremos, cuyo origen, explicado en la sección anterior, se atribuye a anomalías positivas de las SST en aguas tropicales de la cuenca de Atlántico, pero esta vez, al norte de la línea ecuatorial.

Varios estudios han documentado la disminución de la variabilidad de las SST en la región ATL-3 que ocurrió a partir 1999 (Prigent et al., 2020; Richter y Tokinaga, 2021; Silva et al., 2021; Richter et al., 2022). Según Crespo et al. (2022) y Yang et al. (2022), la estabilización general de la atmósfera tropical y el océano bajo el calentamiento global, debilita las teleconexiones océano-atmósfera que son necesarias para producir Niños Atlánticos fuertes y duraderos. Es importante resaltar que, para las fechas de sus respectivas publicaciones, estos autores, así como el propio IPCC (2021) en su último informe (AR6), proyectaban en sus modelos una reducción sostenida en las SST de ATL-3 hasta finales del siglo XXI. Sin embargo, desde principios del 2012 y hasta el presente, ha ocurrido un incremento significativo ($P < 0,01$) en las SST de ATL-3 ($\approx 0,007$ °C.mes⁻¹). Más aún, desde el 2019 hasta el presente, han ocurrido tres pulsos adicionales importantes en las SST del ATL-3. Se trata de dos pulsos cortos ocurridos en Jul 2019/Ene 2020 y luego en Mar 2021/Jul 2021, generando anomalías positivas de 1.73 y 1.49°C, respectivamente, así como un tercer pulso iniciado en Jul/2022, actualmente en desarrollo, generando para Dic/2023, luego de 21 meses continuamente calientes, una SSTA positiva de 1,87°C.

Si bien este último pulso refleja un calentamiento sin precedentes en ATL-3, se trata también de un evento muy reciente, por lo que la bibliografía especializada aún no se encuentra disponible. Sin embargo, en relación al primero de estos tres recientes pulsos, Richter et al. (2022) lo refiere como un evento muy atípico, no solo por tratarse de uno de los eventos Niño Atlántico más fuertes de los últimos 40 años, sino que también ocurrió durante una época inusual del año. Según estos autores, el Niño Atlántico (ie. calentamiento importante en ATL-3) se desarrolla en la primavera del hemisferio norte (es decir, de marzo a mayo) y alcanza su punto máximo en el verano (junio-agosto), pero el Niño Atlántico de 2019 se desarrolló mucho más tarde en el otoño. Si bien se han documentado este tipo de eventos de finales de otoño (Okumura y Xie, 2006; Valles-Casanova et al., 2020), tienden a ser mucho más débiles que los del verano. A pesar que la causa de la disminución de la variabilidad de ATL-3, así como de su posterior y abrupto calentamiento, sigue sin estar clara, y que en contraste con ENOS, el índice ATL-3 no tiene una escala de tiempo dominante, lo que lo hace muy difícil de predecir (Tan et al., 2023), se hace imperativo monitorear esta región del Atlántico ecuatorial durante los próximos años (Richter, 2024). Según este autor, además de las temperaturas superficiales, es indispensable incluir mediciones de las temperaturas oceánicas en niveles más profundos, así como conocer sus interacciones con las aguas más superficiales.

Existe un esfuerzo reciente por proyectar la respuesta de las precipitaciones de Venezuela al cambio climático, específicamente, a través del análisis de los datos disponibles en WorldClim 2.1 (serie 1970-2000) (Viloria et al., 2023). Estos autores pronostican una importante reducción, espacialmente diferenciable, de las precipitaciones medias anual en Venezuela (≈ 100 mm). Es importante resaltar que la referida investigación no incluye, ni en sus modelos ni en su discusión, consideraciones a las más recientes tendencias relativas al calentamiento oceánico actual. Como se refirió anteriormente, la información generada por modelos consolidados preexistentes como el CMIP6, utilizada como un importante referente en el último informe del IPCC (AR6, IPCC, 2021), así como en las proyecciones climáticas futuras disponibles de WorldClim 2.1, ha demostrado no ser confiable en predecir los cambios climáticos más recientes, especialmente los referidos a la velocidad e intensidad real que están sucediendo actualmente muchos de los cambios. Más aún, este pronóstico de una disminución de las lluvias también fue referido tanto en la Primera Comunicación Nacional (MARN, 2005), como en la Segunda Comunicación Nacional sobre cambio climático (MINEA, 2017). Los modelos climáticos empleados en estas dos comunicaciones estaban basados, a su vez, en los Escenarios de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero y desarrollados para el AR3 y el AR5 del IPCC (IPCC, 2001 y 2013), respectivamente. Al respecto, la ACFIMAN-SACC (2018) sostiene que algunos de los modelos empleados por el IPCC en sus informes no simulan bien la estacionalidad en Venezuela, razón por la cual sus resultados no pueden ser considerados como representativos de las proyecciones de la

variación del cambio climático y deben ser utilizados con reservas a los efectos de su interpretación. Sobre los modelos empleados por el IPCC en la generación de su Sexto Informe de Evaluación (AR6-IPCC), Rahmstorf (2024) advierte que algunos de estos pueden generar, en muchas situaciones, subestimaciones en sus resultados.

4.3 Sobre el efecto de eventos La Niña y El Niño en las precipitaciones en Venezuela

Según Zhang et al. (2022a), las precipitaciones del 89,4% del área de América del Sur tiene una correlación significativa con la SST en la región NIÑO 1+2, el coeficiente de correlación medio es de 0,55 para la precipitación regional. En el caso de Venezuela, algunos autores resaltan la importancia de ENOS como factor determinante en la dinámica de sus precipitaciones (Marteló 2012). Según Cárdenas et al. (2002 y 2003), en Venezuela, El Niño tiende a reducir la lluvia y La Niña a aumentarla. Sobre esta correlación, CNMeH (1998) y Marteló (2003) sostienen que el efecto de ENOS, tanto en su fase cálida (El Niño) como en su fase fría (La Niña), es mayor en la temporada seca e inicios de la temporada lluviosa, pero es muy difícilmente detectable durante la temporada lluviosa. Los resultados de la presente investigación coinciden con esta última apreciación: La máxima correlación entre ENOS (ie. entre las SST de NIÑO 1+2 y de NIÑO 3.4) y las precipitaciones está restringida, en la mayoría de los casos, al lapso que corresponde a su estación seca formal e histórica. Por lo tanto, ENOS tiene la capacidad de afectar significativamente aquel lapso que concentra, en la mayoría de las regiones naturales evaluadas, menos del 7% de sus precipitaciones. Es decir, en Venezuela, la estacionalidad es un factor determinante referido a los efectos netos de un evento El Niño y/o La Niña. La respuesta en términos de la generación de un pulso seco (ie. de una sequía) en el territorio nacional, generados por un evento El Niño, sería inferior a aquella que resulta del calentamiento de las regiones atlánticas ATL-3 y TSA. Más aún, los resultados de la presente investigación también muestran evidencias que cuando se eliminan de la serie 1982-2023 todos los datos de SST vinculables a eventos El Niño y La Niña, desde los más fuertes hasta los más débiles, de las regiones oceánicas NIÑO 1+2 y NIÑO 3.4, los efectos sobre las precipitaciones se incrementan significativamente ($P < 0,01$). Esto es indicio de que, más allá de la ocurrencia de un evento El Niño o La Niña, sea este fuerte o no, existen otras teleconexiones (o combinación de estas) con capacidad de determinar la dinámica de las precipitaciones en Venezuela. Paredes et al. (2016b) propone que gran parte de las sequías de gran cobertura en el territorio venezolano pueden ser atribuidas a fuertes acoplamientos entre ENOS y la SST del Atlántico Norte. Quiroz-Ruiz et al. (2016) sostienen que las sequías hidrológicas en las cuencas aportantes analizadas no pueden atribuirse solo al fenómeno oceánico-atmosférico El Niño, indicando que otros mecanismos físicos desencadenaron algunas de los pulsos secos previamente analizadas.

5 Conclusiones

Se trata del primer estudio que aborda la problemática generada por la ocurrencia de un calentamiento oceánico generalizado sin precedentes, aún en desarrollo, a una velocidad no prevista en ninguno de los modelos preexistentes, con capacidad de generar una nueva realidad climática con importantes implicaciones para Venezuela y para la región. En relación a esta problemática, la presente investigación genera información de elevado valor estratégico, disponible a los tomadores de decisiones, a la comunidad científica y a la sociedad en general, con aplicación suficientemente directa en la identificación de las prácticas más acertadas de adaptación y/o mitigación, así como la identificación de potenciales situaciones y zonas de riesgo y vulnerabilidad, basada en evidencias sólidas sobre los siguientes aspectos medulares: 1- La evolución y dinámica de los eventos climáticos extremos en Venezuela, 2 - Su origen y factores determinantes, y 3- Pronósticos confiables basados en determinantes identificados y tendencias actuales.

Entre los principales resultados de la presente investigación se tienen:

- Los eventos climáticos más extremos ocurren de una manera generalizada, en casi todas las regiones. El hecho de que más de un 25% de las precipitaciones históricas estén asociadas a la ocurrencia de estos eventos extremos alerta, no solo sobre una importante y persistente condición de vulnerabilidad y riesgo en Venezuela, sino también de la elevada dinámica y complejidad de las teleconexiones involucradas. Para todas las regiones, los pulsos húmedos presentaron una dinámica temporal distinta a aquella de los pulsos secos. Esto arroja evidencias de que, en la generación de estos pulsos, son distintos los índices macroclimáticos involucrados.
- El calentamiento oceánico global actual sin precedentes ha resultado en un muy rápido y sostenido calentamiento, también sin precedentes, de las aguas superficiales de las regiones oceánicas con capacidad probada de afectar, muy significativamente y en el término de pocos meses, las precipitaciones en gran parte del territorio de Venezuela.
- Calentamientos relativamente abruptos y especialmente intensos de las aguas del Mar Caribe y del Atlántico norte tropical (ie. CARIBE y TNA, respectivamente) han generado los principales y más intensos pulsos húmedos históricos en vastas regiones de Venezuela, explicando entre el 30 y el 68% de su variabilidad.
- Por otro lado, calentamientos en las regiones atlánticas tropicales y ecuatoriales (ie. TSA y ATL-3), explican entre el 30 y el 80% de la variabilidad de los pulsos secos más importantes ocurridos en Venezuela durante la

serie 1981-2023. Son las anomalías positivas de ATL-3, vinculadas al Niño Atlántico, las responsables de la mayor variabilidad de los eventos secos.

- Para el momento que se escribe el presente trabajo, la temperatura global de la superficie del mar (60°S-60°N, 0-360°E) presenta una anomalía de +0,78°C (https://climateranalyser.org/clim/sst_daily/, visitado el 24-04-2024). La correspondiente anomalía en SST de ATL-3 es de +1,83°C, así como en las aguas del Mar Caribe y el Atlántico norte tropical (ie. CARIBE y en TNA, es de +1,26 y +1,58°C, respectivamente). Se trata, sin dudas, de un calentamiento oceánico generalizado sin precedentes.

- Sobre este calentamiento, no existen evidencias que permitan afirmar que la presencia de aguas cálidas en el Atlántico sur tropical y/o ecuatorial, así como en el Mar Caribe y en el Atlántico norte tropical, pueda revertirse prontamente. Considerando que el calentamiento oceánico, además de haberse extendido e intensificado, también se ha estado profundizando (Cheng et al., 2024), las actuales anomalías positivas en estas regiones oceánicas pudieran demorarse años en revertirse.

- Ahora bien, es importante resaltar que una menor frecuencia e intensidad de eventos Niño Atlántico (ie. un debilitamiento en la variabilidad de las SST en la región ATL-3) resultaría en un abrupto y significativo incremento de las precipitaciones en Venezuela. Por otro lado, de ocurrir una reducción en la tendencia actual del calentamiento de las aguas del Mar Caribe y el Atlántico norte tropical, es de esperarse un incremento rápido en la extensión y la intensidad de la condición de sequía que afecta actualmente a Venezuela.

- Por lo tanto, partiendo de esta nueva realidad climática, existe una posibilidad real de que, hasta tanto no se revierta la condición cálida actual, los pulsos de sequía extrema, espacial y temporalmente extensos, generados principalmente por una condición Niño Atlántico casi permanente, serán fenómenos climáticos recurrentes que alternarán con aquellos pulsos húmedos extremos, generados por el simultáneo calentamiento de las aguas del Mar Caribe y el Atlántico norte tropical. Los pulsos húmedos, si bien extremos, serían a su vez breves, vinculables a una exacerbación de la actividad ciclónica resultado de la persistencia de aguas cálidas en esta sección de la cuenca atlántica.

- Producto de esta nueva realidad climática, regiones como Los Llanos, Los Andes, la Cordillera Central, la cuenca del Lago de Maracaibo y el Sur del Orinoco se encuentran actualmente en grave riesgo, ya que buena parte de su extensión presenta una sequía que ha prevaecido durante casi una década, condición altamente vulnerable en un escenario, como el presente, donde la condición extremadamente seca se ve abrupta y brevemente interrumpida por pulsos de lluvias especialmente intensas.

- En relación a estos pulsos de lluvia, son las variaciones superiores a 1,5°C en las aguas superficiales del Mar Caribe y/o del Atlántico norte tropical, las que generan las condiciones de lluvia más intensas en vastas regiones de Venezuela (hasta de 80 mm.año⁻¹). Pero, por tratarse éste último de un promedio regional, las lluvias pueden llegar a ser realmente extremas en un sector y época determinada (eg. La Tragedia de Vargas, Dec-1999).

- En Venezuela, la estacionalidad es un factor determinante referido a los efectos netos de un evento El Niño y/o La Niña (ie. eventos ENOS). La respuesta en términos de la generación de un pulso seco (ie. de una sequía) en el territorio nacional, generado por un evento El Niño (del Pacífico), sería inferior a aquella que resulta del calentamiento de la región oceánica ATL-3. Es decir, las precipitaciones en Venezuela son más sensible a la ocurrencia de un Niño Atlántico que a la ocurrencia de un evento El Niño en el Pacífico. Lo anterior es cierto incluso para eventos El Niño realmente extremos (ie. mega-Niños), como fueron los de 1982/83 y 1997/98.

Es importante resaltar que, por tratarse el actual calentamiento oceánico de un proceso abrupto, para su mejor seguimiento y predicción, se hace necesario incluir en las próximas investigaciones mejoras relativas a la resolución temporal y espacial de la información pluviométrica, así como aquella referida a las temperaturas oceánicas. En este sentido, en la siguiente fase de nuestras investigaciones, atenderemos esta necesidad e incluiremos información de distintos satélites que logren sobrellevar las actuales limitaciones técnicas.

Por último, los resultados de la presente investigación aportan evidencias tangibles sobre las alteraciones en las precipitaciones continentales generadas por el actual proceso de debilitamiento de la AMOC, así como del riesgo concreto que representa, para Venezuela y la región, alcanzar el punto de inflexión que genere el colapso abrupto de la circulación oceánica empujándonos irremisiblemente fuera del clima estable del Holoceno hacia aguas desconocidas, como oportunamente advierte Rahmstorf, (2024). La velocidad e implicaciones de los más recientes cambios climáticos han generado muchas expectativas y presiones a la comunidad científica. A pesar de esto, la mayoría de las investigaciones sobre el cambio climático lo han abordado, como un proceso más bien gradual. Las comunicaciones nacionales sobre el cambio climático emitidas por Venezuela, así como los distintos informes de evaluación del IPCC (eg. AR6, AR5, etc.), presentan este sesgo. La prioridad actual, por lo tanto, ya no es solo la de demostrar cuan efectivos somos pronosticando el clima que enfrentarán futuras generaciones, sino también la de prever, sobre la marcha, los efectos de cambios climáticos que ya están sucediendo y afectan nuestra propia generación, con capacidad de afectar severamente y en tiempo real la sostenibilidad de nuestro desarrollo, así como la conservación y el funcionamiento de nuestro entorno. El presente trabajo representa un importante esfuerzo en esa dirección.

6 Agradecimientos

La presente investigación contó con el apoyo del FONACIT-MinCyT a través del financiamiento de los proyectos marco titulados “De megasequías hasta grandes inundaciones – El origen, la dinámica, el pronóstico y los efectos de una nueva realidad de extremos climáticos para Venezuela y Sudamérica” y “Sistema de Servicios de Cambio Climático (S2C2-IVIC) – Sistema científico interdisciplinario para la generación de servicios climáticos confiables para el pronóstico, monitoreo y previsión de impactos de la nueva realidad climática nacional y global”. De igual forma, la participación del Dr. Ramoni-Perazzi contó con el valioso apoyo del Progetto ManGrowth della Cooperazione Italiana (Sapienza – Eduardo Mondlane). Los autores también desean agradecer la importante participación de instituciones como el CESIMO y el Laboratorio de Ecología de Insectos, ambos de la Universidad de Los Andes, Mérida-Venezuela, el GRUPO-FCA-FAGROCLIM de la Universidad Técnica de Manabí, Lodana-Ecuador, el Instituto de Biodiversidad, Conservación y Manejo de Recursos Naturales de la Universidad Nacional Experimental de Los Llanos “Ezequiel Zamora”, Barinas-Venezuela y del Centro de Biotecnología Agrícola, IVIC, Caracas-Venezuela.

7 Referencias bibliográficas

- Academia de Ciencias Físicas, Matemáticas y Naturales - Secretaría Académica de Cambio Climático - ACFIMAN-SACC (2018): Primer Reporte Académico de Cambio Climático 2018: Contribución de los Grupos de Trabajo I, II y III al Primer Reporte Académico de Cambio Climático (PRACC) de la Secretaría Académica de Cambio Climático (SACC) de la Academia de Ciencias Físicas, Matemáticas y Naturales (ACFIMAN) de Venezuela. Caracas, ACFIMAN-SACC. 454p.
- Andressen R, Pulwarty R (2001): Análisis de las lluvias excepcionales causantes de la tragedia del estado Vargas, Venezuela, en diciembre de 1999. IV Simposio Internacional de Desarrollo Sustentable en Los Andes. Mérida, Venezuela. pp. 148-167.
- Archer D, Rahmstorf S (2010): The climate crisis: an introductory guide to climate change. The Edinburgh Building, Cambridge CB2 8RU, UK: 260p.
- Cárdenas P, Martelo MT, García LF, Gil A (2003): Impacto de los eventos El Niño – Oscilación del Sur en Venezuela. Parte II. Caracas, Venezuela, Corporación Andina de Fomento - CAF.
- Cheng L, Abraham J, Trenberth KE, Boyer T, Mann ME, Zhu J, Wang F, Yu F, Locarnini R, Fasullo J, Zheng F, Li Y, Zhang B, Wan L, Chen X, Wang D, Feng L, Song X, Liu Y, Reseghetti F, Simoncelli S, Gouretski V, Chen G, Mishonov A, Reagan J, Von Schuckmann K, Pan Y, Tan Z, Zhu Y, Wei W, Li G, Ren Q, Cao L, Lou Y (2024): New Record Ocean Temperatures and Related Climate Indicators in 2023. *Adv. Atmos. Sci.*
- Comarazamy DE, González JE, Moshary F, Piasecki M (2015): On the hydro-meteorological changes of a tropical water basin in the Caribbean and its sensitivity to mid-term changes in regional climate. *J. Hydrometeorol.*, 16:97–1013. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-14-0083.1>.
- Comisión Nacional de Meteorología e Hidrología (CNMeH) – CONICIT (1998): El Fenómeno El Niño y su posible influencia sobre el Territorio de Venezuela. Caracas. 21p.
- Copernicus Climate Change Service - C3S: (2024): Near-real time updates of key global climate variables from the Copernicus Climate Change Service (C3S).
- Crespo LR, Prigent A, Keenlyside N, Koseki S, Svendsen L, Richter I, Sanchez-Gomez E (2022): Weakening of the Atlantic Niño variability under global warming. *Nat. Clim. Chang.*, 12:822–827.
- Ditlevsen P, Ditlevsen S (2023): Warning of a forthcoming collapse of the Atlantic meridional overturning circulation. *Nature Comm.*, 14:4254.
- Funk C, Peterson P, Landsfeld M, Pedreros D, Verdin J, Shukla S, Husak G, Rowland J, Harrison L, Hoell A, Michaelsen J (2015): The climate hazards infrared precipitation with stations—a new environmental record for monitoring extremes. *Sci. Data*, 2:150066.
- Glenn E, Comarazamy D, González JE, Smith T (2015): Detection of recent regional sea surface temperature warming in the Caribbean and surrounding region. *Geophys. Res. Lett.*, 42: 6785-6792.
- Goldbrunner AW (1976): El clima de Venezuela y su clasificación. Instituto Universitario Pedagógico de Caracas/Servicio de Meteorología y Comunicaciones de la Fuerza Aérea Venezolana. Caracas.
- Guenni L, Degryze E, Alvarado K (2008): Análisis de la tendencia y la estacionalidad de la precipitación mensual en Venezuela. *Rev. Col. Estadíst.*, 31: 41-65.
- Guevara Pérez E, Paredes F (2007): Influencia de variables macroclimáticas sobre el régimen pluviométrico del Estado Cojedes, Venezuela. *Revista Ingeniería UC*, 14:49-56.

- Huber O, Oliveira-Miranda MA (2010): Ambientes terrestres. Unidades de paisaje de Venezuela 2010. Pp: 54-89. En: J.P. Rodríguez, F. Rojas- Suárez y D. Giraldo Hernández (eds.). Libro Rojo de los Ecosistemas Terrestres de Venezuela. Provita, Shell Venezuela, Lenovo (Venezuela). Caracas: Venezuela.
- IPCC (2001): Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Houghton, J.T., Y. Ding, D.J. Griggs, M. Noguer, P.J. van der Linden, X. Dai, K. Maskell, and C.A. Johnson (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 881pp.
- IPCC (2013): Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.
- IPCC (2021): Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2391 pp.
- Lenton TM, Laybourn L, Armstrong McKay DI, Loriani S, Abrams JF, Lade SJ, Donges JF, Milkoreit M, Smith SR, Bailey E, Powell T, Fesenfeld L, Zimm C, Boulton CA, Buxton JE, Dyke JG, Ghadiali A (2023): Global Tipping Points Report 2023. University of Exeter, Exeter, UK.
- Martelo MT (2003): Influencia de las variables macroclimáticas en el clima de Venezuela. Caracas, Venezuela, Dirección de Hidrología, Meteorología y Oceanología – Dirección General de Cuencas Hidrográficas - MARN: 72p.
- Martelo MT (2012): Impacto del cambio climático en la agricultura de Venezuela. Rev. Fac. Agron., 71:66-81.
- McKee TB, Doesken NJ, Kleist J (1993): The relationship of drought frequency and duration to time scales. Eighth Conference on Applied Climatology. Anaheim, California: 6.
- Mechoso CR, Robertson AW, Ropelewski CF, Grimm AM (2005): The American monsoon systems. En: Chang C-P, Wang B, Lau N-CG, editors. The Global Monsoon System: Research and Forecast. Geneva, Switzerland: World Meteorological Organization; 2005. pp. 197–206.
- Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales – MARN (2005): Primera Comunicación Nacional en Cambio Climático de Venezuela. Caracas, República Bolivariana de Venezuela. 162p.
- Ministerio del Poder Popular para el Ecosocialismo y Aguas – MINEA (2017): Segunda Comunicación Nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático (CMNUCC). Caracas, República Bolivariana de Venezuela. 385p.
- Okumura Y, Xie S-P (2006): Some overlooked features of tropical Atlantic climate leading to a new Niño-like phenomenon. J. Clim., 19:5859– 5874.
- Oliver ECJ, Benthuisen JA, Darmaraki S, Donat MG, Hobday AJ, Holbrook HJ, Schlegel R, Gupta AS (2021): Marine Heatwaves. Ann. Rev. Marine Sci., 13:20.21-20.30.
- Paredes F, Barbosa HA, Lakshmi-Kumar TV (2017): Validating CHIRPS-based satellite precipitation estimates in Northeast Brazil. J. Arid Environ., 139:26-40.
- Paredes F, Alves-Barbosa H, Peñaloza-Murillo M, Moreno M, Farias A (2016a): Intercomparison of improved satellite rainfall estimation with CHIRPS gridded product and rain gauge data over Venezuela. *Atmósfera*, 29:323-342.
- Paredes F, Alves-Barbosa H, Quiroz-Ruiz I, Peñaloza-Murillo MA (2016b): Patrones de circulación atmosférico-oceánicos a meso-escala vinculados a las sequías severas y extensas en Venezuela. *Rev. Bras. Meteorol.*, 31:468-489.
- Pearson H (2024): The rise of eco-anxiety. *Nature*, 628:256-285.
- Prigent A, Lübbecke JF, Bayr T, Latif M, Wengel C (2020): Weakened SST variability in the tropical Atlantic ocean since 2000. *Clim. Dyn.*, 54:2731– 2744.
- Pita MF (2001): Un nouvel indice de sécheresse pour les domaines méditerranéens. Application au bassin du Guadalquivir (sudouest de l'Espagne). *Publications de l'Association Internationale de Climatologie*, 13:225-233.
- Quiroz-Ruiz I, Paredes F, Guevara-Pérez E (2016): Incidencia de las sequías sobre las cuencas aportantes a los grandes embalses en Venezuela. *Ágora de Heterodoxias*, 2:65-89.
- Rahmstorf S, Richardson K (2007): *Wie Bedroht Sind die Ozeane? Biologische und physikalische Aspekte*. Fischer Taschenbuch Verlag in der S. Fischer Verlag GmbH, Frankfurt am Main: 210p.

- Rahmstorf S (2024): Is the Atlantic overturning circulation approaching a tipping point? *Oceanography*, Early Online Release.
- Reid, P.C. 2016. Ocean warming: setting the scene. En D. Laffoley y J.M. Baxter, eds. *Explaining ocean warming: causes, scale, effects and consequences*, pp. 17–45. Gland, Switzerland, IUCN.
- Richter I (2024): Atlantic Niños aren't what they used to be. *CLIVAR - Climate and Ocean - Variability, Predictability and Change*.
- Richter I, Tokinaga H (2021): The Atlantic zonal mode: Dynamics, thermodynamics, and teleconnections. En SK Behera (Ed.), *Tropical and extratropical air-sea interactions*. Elsevier.
- Richter I, Tokinaga H, Okumura YM (2022): The extraordinary equatorial Atlantic warming in late 2019. *Geophys. Res. Lett.*, 49:e2021GL095918.
- San José, JJ, Montes RA, Thielen D (2009): Effects of land use and precipitation changes on carbon stock in a basin of the Orinoco lowlands: 1938-1997. *IOP Conference Series: Earth Environ. Sci.*, 6:342041.
- Silva P, Wainer I, Khodri M (2021): Changes in the equatorial mode of the Tropical Atlantic in terms of the Bjerknes Feedback Index. *Clim. Dyn.*, 56:3005-3024.
- Stephenson TS, Vincent LA, Allen T, Van Meerbeek CJ, McLean N, Peterson TC, Taylor MA, Aaron-Morrison AP, Auguste T, Bernard D, Boekhoudt JRI, Blenman RC, Braithwaite GC, Brown G, Butler M, Cumberbatch CJM, Etienne-Leblanc S, Lake DE, Martin DE, McDonald JL, Zaruela MO, Porter AO, Santana Ramirez M, Tamar GA, Roberts BA, Sallons Mitro S, Shaw A, Spence JA, Winter A, Trotman AR (2014): Changes in extreme temperature and precipitation in the Caribbean region, 1961–2010, *Int. J. Climatol.*, 34:2957 – 2971.
- Tan W, Liu Y, Li X, Johnson NC, Hu Z-Z (2023): Multi-time scale variations in Atlantic Niño and a relative Atlantic Niño index. *Geophys. Res. Lett.*, 50:e2023GL106511.
- Thielen D (2003): Tendencias de la precipitación y la dinámica espacial y temporal de las leñosas en una sabana neotropical. Instituto de Ciencias Ambientales y Ecológicas. Mérida, Venezuela, Universidad de Los Andes: 237p.
- Thielen D, Cevallos J, Erazo T, Zurita IS, Figueroa-Pico JA, Quintero JI, Matute N, Velásquez G, Puche ML (2015): Dinámica de los eventos climáticos extremos en la cuenca del río Portoviejo, Manabí, Ecuador. *Rev. La Técnica*, 14: 80-91.
- Thielen D, Cevallos J, Erazo T, Figueroa-Pico JA, Velásquez G, Matute N, Quintero JI, Puche ML (2016): Dinámica espacio-temporal de las precipitaciones durante el evento de El Niño 97/98 en la cuenca de Río Portoviejo, Manabí, costa ecuatoriana del Pacífico. *Rev. Climatol.*, 16:35-50.
- Thielen D, Schuchmann K-L, Ramoni-Perazzi P, Marquez M, Rojas W, Quintero J, Isaac-Marques M (2020): Quo vadis Pantanal? Expected precipitation extremes and drought dynamics from changing sea surface temperature. *PLoS ONE*, 15:e0227437.
- Thielen D, Ramoni-Perazzi P, Marquez M, Quintero J, Soto-Werschitz IA, Rojas W, Thielen K, Puche ML (2021a): Hydroclimatological extreme events affecting the Daule-Peripa Reservoir (Coast of Ecuador): Historical dynamics and teleconnections. *Rev. Climatol.*, 21:127-145.
- Thielen D, Ramoni-Perazzi P, Puche ML, Márquez M, Quintero JI, Rojas W, Soto-Werschitz IA, Thielen K, Nunes A, Libonati R (2021b): The Pantanal under Siege—On the Origin, Dynamics and Forecast of the Megadrought Severely Affecting the Largest Wetland in the World. *Water*, 13:3034.
- Thielen D, Ramoni-Perazzi P, Puche ML, Marquez M, Quintero JI, Rojas W, Quintero A, Bianchi G, Soto-Werschitz IA, Arizapana-Almonacid MA (2023): Effect of extreme El Niño events on the precipitations of Ecuador. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 23:1507–1527.
- Vallès-Casanova I, Lee S-K, Foltz GR, Pelegrí JL (2020): On the spatiotemporal diversity of Atlantic Niño and associated rainfall variability over West Africa and South America. *Geophys. Res. Lett.*, 47:e2020GL087108.
- Viloria JA, Olivares BO, García P, Paredes F, Rosales A (2023). Mapping Projected Variations of Temperature and Precipitation Due to Climate Change in Venezuela. *Hydrology*, 10.
- World Meteorological Organization - WMO (2016a): Guidelines on the definition and monitoring of extreme weather and climate events, World Meteorological Organization - WMO. Geneva 2, Switzerland.
- World Meteorological Organization - WMO (2016b): Handbook of Drought Indicators and Indices. Geneva, World Meteorological Organization – WMO. Geneva 2, Switzerland.
- Yang Y, Wu L, Cai W, Jia F, Ng B, Wang G, Geng T (2022): Suppressed Atlantic Niño/Niña variability under greenhouse warming. *Nat. Clim. Chang.*, 12:814–821.

Zhang C, Huang G, Yan D, Wang H, Zeng G, Wang S, Li Y (2022a): Analysis of South American climate and teleconnection indices. *J. Contam. Hydrol.*, 244:103915.

Zhang X, Zheng F, Zhu J, Chen X (2022b): Observed Frequent Occurrences of Marine Heatwaves in Most Ocean Regions during the Last Two Decades. *Adv. Atmos. Sci.*