

Ciencias de la Tierra

Artículo original

Múltiples escalas temporales del océano y el clima en el mar Caribe y la cuenca Colombia durante los últimos 125.000 años

Multiple time scales of the ocean and climate in the Caribbean Sea and the Colombia Basin during the last 125.000 years

 Gladys Bernal

Departamento de Geociencias y Medio Ambiente, Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, Colombia

Artículo de posesión como académica correspondiente de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales

Resumen

Los últimos 125.000 años constituyen un intervalo clave para comprender la variabilidad del océano y el clima en el mar Caribe y la cuenca Colombia, ya que incluyen el último interglacial, la última glaciación, la deglaciación, el Holoceno y el período de calentamiento actual. Este artículo recopila e integra información paleoceanográfica, paleoclimática e instrumental sobre la variabilidad del clima y el océano en el Caribe, con énfasis en la cuenca Colombia, en escalas milenarias, centenarias, multidecadales y decadales. La revisión muestra que los cambios regionales han estado modulados por la interacción entre forzamientos orbitales, desplazamientos de la zona de convergencia intertropical, variaciones en la circulación meridional del Atlántico, cambios en la temperatura superficial del mar, el balance entre evaporación, precipitación y escorrentía, la surgencia del sur del Caribe y modos de variabilidad climática. A escala milenaria, el Caribe alternó entre condiciones cálidas y húmedas durante fases interstadiales, y condiciones más frías, secas y salinas durante fases estadales. A escala centenaria, en el Caribe se han producido respuestas regionalmente heterogéneas. En escalas decadales y multidecadales, la variabilidad del Atlántico y el Pacífico modula la precipitación, la salinidad, la actividad ciclónica, las olas de calor marinas y la dinámica costera. La cuenca Colombia es una región estratégica para estudiar las conexiones entre el Atlántico, el Caribe, el norte de Suramérica y el Pacífico, pero aún se requieren reconstrucciones paleoceanográficas de alta resolución que permitan diferenciar señales locales, regionales y hemisféricas.

Palabras clave: Último Máximo Interglacial; Último Máximo Glacial; calentamiento medieval; Pequeña Edad de Hielo; período de calentamiento actual; variabilidad decadal.

Abstract

The last 125.000 years constitute a key interval for understanding ocean-climate variability in the Caribbean Sea and the Colombia Basin, as they encompass the last interglacial, the last glacial, the deglaciation, the Holocene, and the current warming period. This article compiles and integrates paleoceanographic, paleoclimatic, and instrumental data on climate and ocean variability in the Caribbean, with an emphasis on the Colombia Basin, at millennial, centennial, multidecadal, and decadal timescales. The review shows that regional changes have been modulated by the interaction among orbital forcings, shifts in the Intertropical Convergence Zone, variations in the Atlantic Meridional Overturning Circulation, changes in sea surface temperature, the evaporation-precipitation-runoff balance, upwelling in the southern Caribbean, and modes of climatic variability. On a millennial scale, the Caribbean alternated between warm, humid conditions during interstadial periods and cooler, drier, and more saline conditions during stadial periods. On a centennial scale, the Caribbean shows regionally heterogeneous responses. On decadal and multidecadal scales, Atlantic and Pacific variability modulates precipitation, salinity, cyclonic

Citación: Bernal G. Múltiples escalas temporales del océano y el clima en el mar Caribe y la cuenca Colombia durante los últimos 125.000 años. Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. 2026 Sep 23. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyn.4102>

Editor: Carlos Alberto Jaramillo Muñoz

***Correspondencia:**
Gladys Bernal; gbernal@unal.edu.co

Recibido: 12 de mayo de 2026

Aceptado: 19 de agosto de 2026

Publicado en línea: 23 de septiembre de 2026



Este artículo está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-Compartir Igual 4.0 Internacional

activity, marine heat waves, and coastal dynamics. The Colombia Basin is a strategic region for studying the connections among the Atlantic, the Caribbean, northern South America, and the Pacific, but high-resolution paleoceanographic reconstructions are still needed to differentiate local, regional, and hemispheric signals.

Keywords: Last interglacial maximum; last glacial maximum; Medieval Warm Period; Little Ice Age; current warming period; decadal variability.

Introducción

Los últimos 125.000 años de la historia del clima y los océanos son de gran interés científico, ya que incluyen eventos de escalas milenarias y todos aquellos de mayor frecuencia contenidos en ellas. Este intervalo de tiempo comienza con el Último Máximo Interglacial (*Last Interglacial Maximum*, LIG, ~125 ka), un período climático equivalente al presente en término de los ciclos glaciales. Contiene una glaciación completa, el Último Máximo Glacial (*Last Glacial Maximum*, LGM, ~21 ka), y la deglaciación hasta el momento actual (Alverson *et al.*, 2003).

En todas las escalas temporales de variabilidad climática encontramos una fluctuación entre condiciones contrastantes: por ejemplo, invierno y verano en la estacionalidad; Niño y Niña en la escala interanual; períodos estadiales e interestadiales en la escala milenaria. Una reconstrucción regional de cada una de las escalas con sus modos fríos y cálidos puede ayudar a entender umbrales, retroalimentaciones y estados múltiples en la relación del océano y el clima. Hay una jerarquía en las escalas climáticas en la que las de mayor duración modulan la variabilidad de las más cortas (Deser *et al.*, 2010). Ejemplos clásicos de estas modulaciones incluyen la mayor frecuencia e intensidad de los eventos del tipo de El Niño en las fases positivas de la oscilación decadal del Pacífico (PDO) y del tipo de La Niña en las fases negativas; o la modulación de los huracanes en escalas multidecadales, en las que una oscilación multidecadal del Atlántico (AMO) positiva aumenta los huracanes intensos.

La reconstrucción de las escalas de variabilidad climática de los últimos 125.000 años en la cuenca Colombia es fundamental para comprender cómo esta región ha respondido a los cambios climáticos naturales bajo condiciones fluctuantes. Dada su posición estratégica entre el Atlántico tropical, el mar Caribe y el norte de Suramérica, sus registros pueden aportar información clave sobre la interacción de estas regiones entre sí y su conexión con el océano Pacífico. Además, hace parte del sistema de corrientes del borde occidental del océano Atlántico, interactuando con la corriente del Golfo y la circulación meridional del Atlántico. (Martínez *et al.*, 2007; Urrego *et al.*, 2019).

En los últimos años se han hecho numerosas investigaciones sobre la variabilidad del océano y el clima en el mar Caribe y la cuenca Colombia en escalas que van desde las milenarias hasta las intraestacionales. Mientras las escalas más cortas pueden estudiarse a partir de registros instrumentales, las escalas decadales a milenarias requieren el estudio paleoceanográfico de los registros naturales. Por eso, la variabilidad anual e interanual es la mejor conocida tanto en el Caribe como en la cuenca Colombia. Autores como Wurtzel *et al.* (2013) reconocen que hay vacíos en la comprensión de la variabilidad climática del Atlántico tropical en escalas subdecadales a centenarias en los últimos 2.000 años dada la brevedad temporal del registro instrumental y la falta de registros sedimentarios de suficiente longitud y resolución.

El conocimiento de la variabilidad climática de la cuenca Colombia en escalas decadales a milenarias debe entenderse en un marco regional más amplio, ya que los cambios registrados en esta zona están estrechamente ligados a la dinámica climática y oceanográfica del mar Caribe y del océano Atlántico tropical (Haug *et al.*, 2001; Cetina-Heredia & Allende-Arandía, 2023). Por ello es necesario integrar y contrastar la información local disponible con estudios realizados en otras regiones del Caribe y del Atlántico tropical, los cuales ofrecen un contexto fundamental para interpretar los patrones de variabilidad climática regional y sus posibles expresiones en la cuenca Colombia. Si bien

actualmente se cuenta con un número significativo de reconstrucciones paleoceanográficas en escalas decadales a milenarias de la región de interés, es importante hacer un análisis conjunto de la información que éstas han aportado para ajustar el conocimiento actual sobre cada escala y sus interacciones.

El objetivo central del estudio fue recopilar e integrar información del clima y el océano en el Caribe con énfasis en la cuenca Colombia, desde el LIG y en escalas milenarias, centenarias y decadales, así como explorar sus interacciones y su influencia en otras escalas de variabilidad. En la **Tabla 1** se resumen los artículos incluidos en esta revisión, especificando la localidad, el tipo de registro natural y su duración. Los artículos consultados incluyen diferentes aproximaciones paleoceanográficas y paleoclimáticas, con distintas resoluciones, modelos cronológicos y suposiciones. Sin embargo, dentro de su contexto específico, cada trabajo contribuyó al conocimiento de la variabilidad del océano y el clima en la región. La pregunta que motivó esta revisión fue la siguiente: ¿cómo se puede sintetizar el conocimiento actual sobre cada escala temporal de variabilidad y sus interacciones y qué vacíos pueden evidenciarse con base en las investigaciones realizadas en la cuenca Colombia y el mar Caribe?

El alcance del estudio es conceptual. Metodológicamente se basó en recoger la información del océano y el clima contenida en la muestra de referencias escogida. Dicha información se comparó y se relacionó en cada escala temporal de interés para lograr una historia del clima y el océano lo más completa posible. Se trata de una revisión integradora en la que las comparaciones entre las distintas contribuciones deben interpretarse como aproximaciones regionales y no como correlaciones cronológicas estrictas. Inicialmente se hizo un análisis de las interacciones del océano y el clima en la cuenca Colombia y de las condiciones oceanográficas resultantes y se continuó con la variabilidad milenaria, centenaria, multidecadal y decadal en el mar Caribe. Por último, la discusión se enfocó en la relación entre escalas, incluidas la interanual, la estacional y los eventos extremos, y en un análisis específico tanto de la información existente sobre la cuenca Colombia como de sus vacíos de información.

Océano y clima en la cuenca Colombia

La cuenca Colombia se ubica en la región suroccidental del mar Caribe, limitada por la dorsal de Beata, el arco insular de las Antillas mayores, la margen continental centroamericana y la margen continental de Colombia y Venezuela (**Figura 1**). Constituye una unidad oceanográfica y tectónica bien definida, con profundidades mayores a los 4.000 m y una superficie aproximada de 1,2 millones de km². La **Figura 2** muestra un esquema conceptual de las interacciones del océano y el clima en la cuenca. Climáticamente está acoplada con los vientos alisios y el chorro de bajo nivel del Caribe (*Caribbean Low Level Jet*, CLLJ), que varían de acuerdo con los movimientos de la zona de convergencia intertropical (*Intertropical Convergence Zone*, ITCZ) y los centros subtropicales de presión atmosférica (**Wang, 2007; Cook & Vizy, 2010; Hidalgo et al., 2015; Hoyos et al., 2018**). Impulsada por los vientos alisios del noreste, la corriente del Caribe (CC) es el principal sistema de la circulación superficial en el mar Caribe. Transporta aguas que ingresan desde el Atlántico tropical, pasa por el Caribe, alimenta la corriente de Yucatán y finalmente se une a la corriente del Golfo. De esta manera, el Caribe funciona como un corredor estratégico que contribuye al transporte meridional de agua y el calor del Atlántico (**Fratantoni, 2001; Richardson, 2005**).

Cuando la CC llega al Caribe occidental, una parte sufre una deflexión meridional hacia el sur, configurando el llamado giro de Panamá Colombia (*Panama Colombia Gyre*, PCG). Este es un giro ciclónico cuasipermanente forzado por la CC, el rotacional del viento y la topografía (**Andrade et al., 2003; Centurionii & Niiler, 2003; Richardson, 2005**). Los vientos alisios en la región favorecen procesos de divergencia y surgencia costera. La principal manifestación de estos procesos es el sistema de surgencia del sur del Caribe (*Southern Caribbean Upwelling System*, SCUS), considerado el núcleo más intenso de

Tabla 1. Resumen de las contribuciones analizadas en este trabajo, con su localización, registro estudiado, variable reconstruida y período.

Tipo de registro	Variable reconstruida	Lugar y coordenadas del registro	Edad	Autores
Núcleos de sedimentos (foraminíferos planctónicos)	SST, productividad	Cuenca Colombia, Colombia 12°44.64'N, 78°44.36'W	560 ka - Presente	Martínez <i>et al.</i> , 2007
Núcleos de sedimentos (Mg/Ca en foraminíferos planctónicos)	SST, SSS	Cuenca Colombia 12°45'N, 78°44'W	460 ka - Presente	Schmidt <i>et al.</i> , 2006; Schmidt y Spero, 2011
Núcleos de sedimentos (B/Ca, $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{11}\text{B}$ en foraminíferos)	$[\text{CO}_3^{2-}]$ y pH	Noroeste de la cuenca Colombia 12°N, 79°W	160 ka - Presente	Yu <i>et al.</i> , 2010
Corales	SST	Bonaire 12°10'N, 68°18'W	130-120 ka	Brocas <i>et al.</i> , 2016
Núcleos de sedimentos (quistes de dinoflagelados)	Productividad, salinidad	Cuenca Cariaco, Venezuela 10°42.37'N, 65°10.18'W	30 ka - Presente	Mertens <i>et al.</i> , 2009
Núcleos de sedimentos (Cd/Ca, $\delta^{13}\text{C}$ en foraminíferos)	Productividad	Cuenca Tobago 11°36.53'N, 60°57.86'W 12°05.51'N, 61°14.01'W	24 ka - Presente	Poggemann <i>et al.</i> , 2017
Núcleos de sedimentos (N total y $\delta^{15}\text{N}$ en sedimento)	Fijación de N y desnitrificación	Cuenca Cariaco, Venezuela 10°42.366' N, 65°10.164' W 10°40.69' N, 64°58.29' W	20 ka - Presente	Meckler <i>et al.</i> , 2007
Núcleo de sedimentos (Ti, Fe) y trampa de sedimentos	Escurrentía	Cuenca Cariaco, Venezuela 10°42.366' N, 65°10.164' W 10.70000°N, 65.94200°W	14 ka - Presente	Peterson y Haug, 2006
Núcleos de sedimentos	SST	Pasaje Anegada-Jungfern 17°50.80'N, 64°48.7290'W	11 ka - Presente	Fischel <i>et al.</i> , 2017
Núcleos de sedimentos (polen)	Vegetación, precipitación, cambios de nivel del mar	Guajira' 11° 34'30" N, 72° 52'36" W 11°24' 39" N, 73°06'00" W	6,3 ka - Presente	Urrego <i>et al.</i> , 2013
Núcleos de sedimentos (textura y geoquímica)	Eventos extremos (tormentas)	Belize 17°18'57.2"N, 87°32'0.60"W	5,7 ka - Presente	Schmitt, <i>et al.</i> , 2025
Núcleos de sedimentos (C/N, $\delta^{13}\text{C}$ en materia orgánica, diatomeas)	Precipitación, cambios de nivel del mar	Ciénaga Grande de Santa Marta 10°51'9.41"N, 74°19'56.18"W	5,3 ka - Presente	Vélez <i>et al.</i> , 2014
Núcleos de sedimentos (foraminíferos, geoquímica)	Precipitación	Cuba 22°10'23.46"N, 83°49'35.80"W 22°08'22.83"N, 83°57'31.18"W	4 ka - Presente	Gregory <i>et al.</i> , 2015
Núcleos de sedimentos en lagos (polen, partículas biogénicas, $\delta^{13}\text{C}$ en materia orgánica)	Precipitación, vegetación y perturbaciones humanas	República Dominicana 18°47'51" N, 70°52'33" W 18°47'45" N, 70°53'13" W	3 ka - Presente	Lane <i>et al.</i> , 2009
Núcleos de sedimentos (Mg/Ca en foraminíferos)	SST	Cuenca Cariaco, Venezuela 10°45.98'N, 64°46.20'W 10°45.77'N, 64°42.25'W	2 ka - Presente	Wurtzel <i>et al.</i> , 2013
Núcleos de sedimentos ($\delta^{18}\text{O}$, $\delta^{13}\text{C}$ y TEX_{86} en sedimento)	SST	Belize 17°18.943'N, 87°32.071'W 17°18.957'N, 87°32.098'W 17°18.950'N, 87°32.118'W	1,8 ka – Presente	Schmitt <i>et al.</i> , 2020
Núcleos de sedimentos (carbono orgánico total, nitrógeno total, C/N, $\delta^{13}\text{C}$)	Precipitación, producción de materia orgánica	Haití 18°30.0931' N, 71°54.0302' W	1 ka - Presente	Noncent <i>et al.</i> , 2023
Núcleo de sedimentos (polen)	Vegetación y dinámica deltaica	Bahía de Cispata (zona costera del Caribe colombiano) 9°23'37" N, 75°48'49" W 9°24'19" N, 75°51'41" W	1 064 CE - Presente	Castaño <i>et al.</i> , 2010
Núcleos de sedimentos (polen)	Precipitación, vegetación y eventos extremos	San Andrés 12°33'50"N, 81°42'W	1 600 CE - Presente	González <i>et al.</i> , 2010
Núcleos de sedimentos (polen)	Vegetación, precipitación	Islas del Rosario 10°09'38.99"N, 75°47'06.99"	1610-Presente	Urrego <i>et al.</i> , 2019
Cordones de playa	Eventos extremos	Islas del Rosario 10°09'35.14"N, 75°47'01.23"	1657-Presente	Puerres <i>et al.</i> , 2018
Corales ($\delta^{18}\text{O}$)	SST, precipitación	Los Roques, Venezuela 11.77°N, 66.75°W	1 918 – 2 004 CE	Hetzinger <i>et al.</i> , 2008

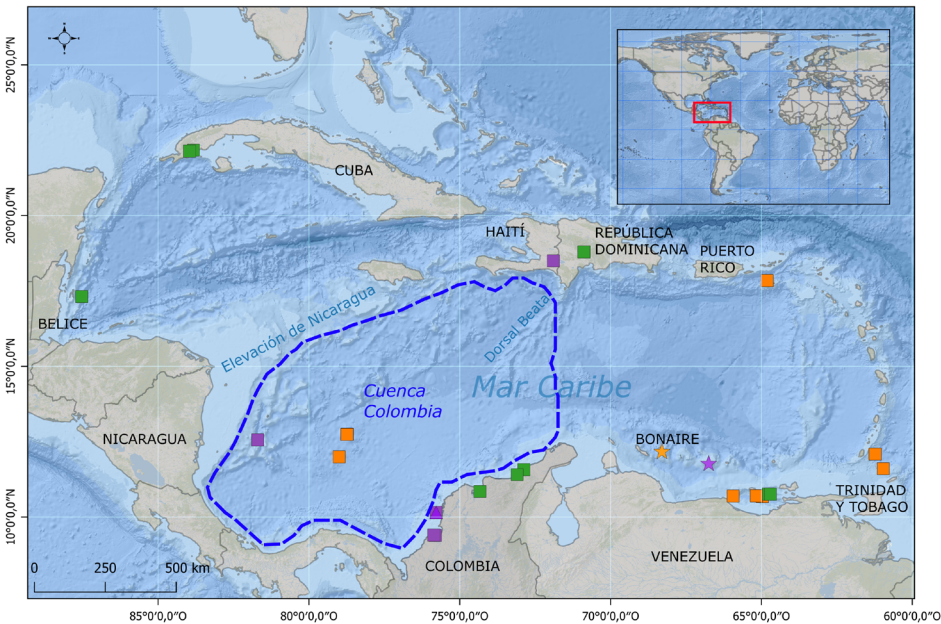


Figura 1. Cuenca Colombia. Ubicación y delimitación. Los puntos marcados muestran las localidades de los registros usados en este trabajo. Los cuadrados indican núcleos de sedimentos, las estrellas indican corales. El color naranja indica registros de más de 10.000 años; el color verde, registros entre los 10.000 y 1.000 años; el color morado, registros de menos de 1.000 años.

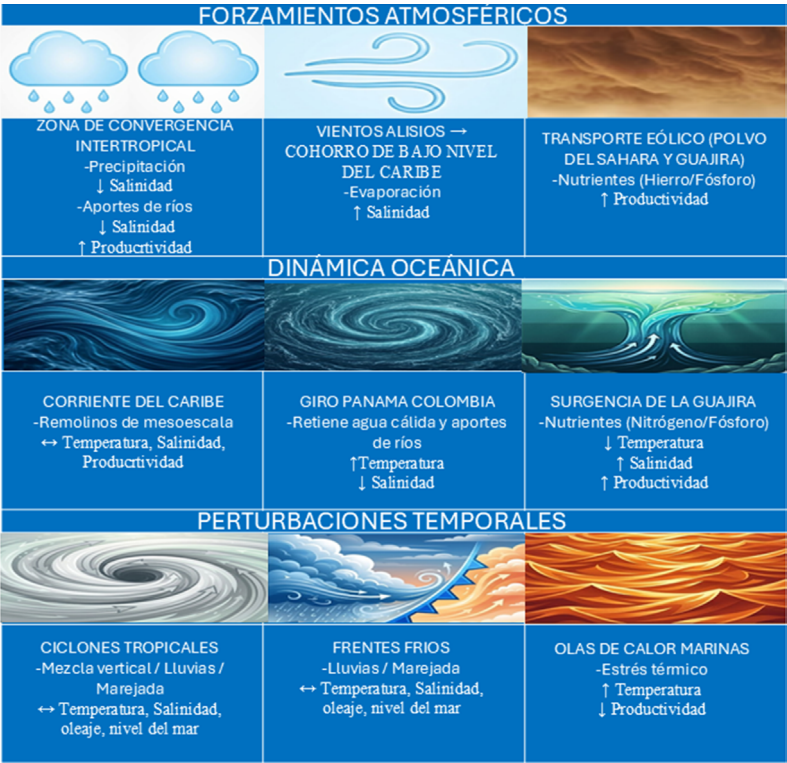


Figura 2. Modelo conceptual de las interacciones de océano y clima en la cuenca Colombia. La interacción de los forzamientos atmosféricos con la dinámica oceánica da como resultado la variabilidad espaciotemporal de las condiciones de temperatura, salinidad y productividad en la cuenca. Las perturbaciones o eventos extremos se superponen y afectan temporalmente estas condiciones.

surgencia de todo el mar Caribe. El SCUS se desarrolla en dos sectores principales de la costa norte de Suramérica: la península de la Guajira en Colombia y la costa norte de Venezuela. (Andrade & Barton, 2005; Rueda-Roa & Muller-Karger, 2013; Santos *et al.*, 2016; Montoya *et al.*, 2018).

Otra característica de la circulación superficial en el Caribe y la cuenca Colombia son los remolinos de mesoescala, originados por inestabilidades de la CC y su interacción con la topografía y las masas de agua (Centurionii & Niiler, 2003; Hu *et al.*, 2004; Richardson, 2005; Jouanno *et al.*, 2008; Alvera-Azcárate *et al.*, 2009; Van der Boog *et al.*, 2019; López-Alzate *et al.*, 2022). Estos remolinos interactúan con las plumas de los ríos y las aguas de surgencia y juegan un papel importante en el transporte de calor, sal, larvas y nutrientes a lo largo del Caribe (Van der Boog *et al.*, 2019).

La salinidad superficial media de la cuenca Colombia (Figura 3) muestra menores valores (34-35) en las aguas advectadas desde la cuenca de Venezuela por la CC y en la esquina suroccidental de la cuenca (región al Sur de 12° N); el centro de la cuenca presenta valores medios (36) y las mayores salinidades se dan en la zona costera de la Guajira (hasta 36,5), producto de la surgencia de aguas subsuperficiales subtropicales (Martins & Stammer, 2015; Beier *et al.*, 2017; González *et al.*, 2023). El agua que entra al Caribe desde el Atlántico por la superficie es agua atlántica diluida por agua dulce de los ríos Orinoco y Amazonas (Hu *et al.*, 2004; Cherubin & Richardson, 2007; Grodsky *et al.*, 2015). Aunque el balance de evaporación, precipitación y escorrentía en la cuenca es prácticamente neutro, la región al sur de los 12° es una zona de dilución con un balance negativo (Beier *et al.*, 2017). El balance atmosférico neto de transporte de humedad en la cuenca Colombia es negativo y la atmósfera de esta región del Caribe exporta humedad hacia la cuenca Caimán y el océano Pacífico (González *et al.*, 2023).

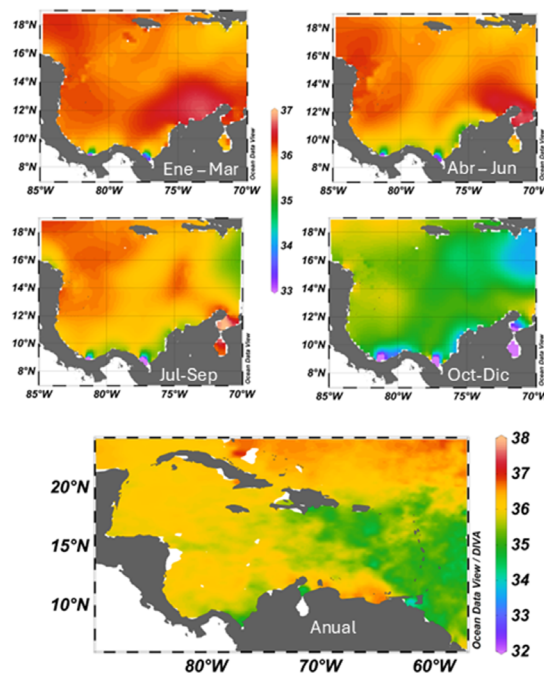


Figura 3. Salinidad superficial media estacional en la cuenca Colombia (arriba) y salinidad superficial media anual del Caribe (abajo). Datos del World Ocean Atlas 2023 WOA23 (https://www.ncei.noaa.gov/products/world-ocean-atlas?utm_source=chatgpt.com). Nótese que la media anual homogeniza los valores y que en las medias estacionales se diferencian mejor las zonas con contrastes de salinidad dentro de la cuenca. La escala no tiene unidades, pues la salinidad de WOA es salinidad práctica en la escala PSS-78. Aunque la salinidad práctica es formalmente adimensional, algunos reportan esta variable con la etiqueta convencional ups (unidades prácticas de salinidad).

El aporte de sedimentos eólico a la cuenca no ha sido cuantificado. El polvo del Sahara es transportado desde el norte de África hasta el Atlántico tropical y el Caribe. Este fenómeno, conocido como la capa de aire del Sahara puede interactuar con la formación de nubes y la radiación solar e influenciar la calidad del aire, las condiciones climáticas locales, la productividad oceánica y los ecosistemas marinos (**Jickells et al.**, 2005; **Kumar et al.**, 2018; **Hernández-Ayala & Méndez-Tejada**, 2024).

La cuenca Colombia es oligotrófica, con zonas de alta fertilización asociadas con la surgencia, la mezcla vertical inducida por mareas y topografía, el transporte lateral por remolinos y los aportes continentales de los ríos. El SCUS posiblemente es la principal fuente de nutrientes que soporta la productividad biológica de todo el mar Caribe (**Correa-Ramirez et al.**, 2020). En la cuenca Colombia la surgencia de la Guajira es la principal fuente de nutrientes a pesar de ser menos productiva que la de Venezuela (**Rueda-Roa & Muller-Karger**, 2013; **Gómez-Gaspar & Acero**, 2020).

Los eventos extremos también juegan un papel importante en la interacción del océano y el clima en la cuenca Colombia. Los ciclones tropicales y los frentes fríos han sido relacionados con eventos extremos de marejadas, inundación costera, vientos y olas (**Ortiz-Royero et al.**, 2013; **Bernal et al.**, 2016; **Osorio et al.**, 2016; **Devis-Morales et al.**, 2017). Las olas de calor marinas (*marine heat waves*, MHW) (**Hobday et al.**, 2016) son uno de los eventos extremos más relevantes, ya que se relacionan con impactos ecológicos y oceánicos. En el Caribe, las MHW han aumentado su intensidad y frecuencia en los últimos 40 años, siendo particularmente fuertes y frecuentes en la costa norte de Suramérica (**Cetina-Heredia & Allende-Arandía**, 2023).

Escalas milenarias en el mar Caribe

Una forma de medir los ciclos milenarios es a partir de los estadios isotópicos marinos (*marine isotope stages*, MIS), que son etapas climáticas globales definidas a partir de los registros isotópicos de oxígeno en foraminíferos marinos, y que reflejan cambios en el volumen de hielo y la temperatura oceánica (**Bradley**, 2015). Los MIS impares se usan para períodos cálidos (interglaciales o interestadiales) y los MIS pares para períodos fríos (glaciales o estadiales). El LIG corresponde al MIS 5. Por lo tanto, el período de tiempo de interés de este artículo abarca desde el MIS 5 hasta el MIS 1. En la **Figura 4** se presenta un resumen de la variabilidad milenaria del mar Caribe durante los últimos 125.000 años.

El MIS 5 es un interglacial complejo, que incluyó algunas fases frías, por lo que se divide en MIS 5a, 5b, 5c, 5d y 5e. El LIG propiamente dicho se da en el MIS 5e, conocido como el Eemiense (129-116 ka). El LIG es conocido por haber tenido niveles del mar superiores al interglacial actual. La evidencia de niveles del mar elevados durante el MIS 5e se encuentra documentada en terrazas de arrecifes de coral levantadas en lugares como Barbados y otras islas del Caribe (**Brocas et al.**, 2016; **Creveling et al.**, 2017).

Se considera que durante el LIG el Caribe experimentó una mayor estacionalidad térmica que en la actualidad y cambios significativos en el ciclo hidrológico impulsados por la posición de la ITCZ (**Brocas et al.**, 2016). El Caribe suroccidental tuvo veranos intensamente cálidos. En Bonaire la estacionalidad de la temperatura superficial del mar (*sea surface temperature*, SST) durante el LIG alcanzó variaciones de hasta 4,9 °C, frente a los ~2,9 °C actuales (**Brocas et al.**, 2016). Este aumento en la estacionalidad se ha atribuido principalmente a un calentamiento mayor durante los veranos del hemisferio norte, coherente con los cambios en la insolación debidos a la configuración orbital de la Tierra (**Schmidt et al.**, 2006; **Brocas et al.**, 2016).

Se ha considerado que en los periodos interestadiales como el LIG, la ITCZ se desplazó hacia una posición más septentrional respecto a los periodos estadiales, lo que favoreció un aumento en la precipitación regional y una reducción en las tasas de evaporación durante el LIG (**Martínez et al.**, 2007). En general, los periodos interglaciales como el LIG parecen tener una salinidad superficial del mar (*sea surface salinity*, SSS) similar o ligeramente menor a la moderna, con un influjo más fuerte de nutrientes y sedimentos provenientes del

FORZAMIENTOS		Posición ITCZ	Configuración orbital	Circulación oceánica (AMOC)
				
		ITCZ	Hidrología y Salinidad	Océano Profundo y Nivel del Mar
126 ka	Último Interglacial (LIG)	Muy al Norte	Veranos muy cálidos, alta pluviosidad, menor salinidad (SSS).	Niveles del mar superiores (+5m en San Andrés) . pH más ácido.
115 ka	Transición a Glaciación	Migración al Sur	Tendencia al enfriamiento y aumento de salinidad por evaporación.	Caídas progresivas del nivel del mar (-9 a -11m). Aguas más básicas.
71 ka	Último Máximo Glacial (LGM)	Extremo Sur	Fuerte aridez regional. Aguas entre 2.1 °C y 2.5 °C más frías que hoy.	Plataformas continentales expuestas. Mejor preservación de carbonatos.
21 ka	Deglaciación y Eventos Abruptos	Fluctuante	H1/YD: Frío y seco en el norte de Sudamérica. B-A: Reforzamiento de la AMOC.	Alternancia entre aguas ricas en nutrientes (H1/YD) y pobres en nutrientes (B-A).
11,7 ka	Holoceno Temprano	Máximo Septentrional	Condiciones más húmedas de los últimos 14k años. Máxima descarga de ríos.	Establecimiento de condiciones modernas.
5,4 ka	Holoceno Tardío al Presente	Migración al Sur	Tendencia general a la aridez. Sequías severas (ej. Colapso Maya hace 1,200 años).	Mayor variabilidad por ENSO, tormentas tropicales y eventos tipo La Niña.
0 ka				

Figura 4. Resumen conceptual de la variabilidad climática milenaria del mar Caribe durante los últimos 125 ka. ITCZ: zona de convergencia intertropical. AMOC: circulación meridional cíclica del Atlántico. H1: evento Heinrich 1. YD: Younger Dryas. B-A: Bolling Allerod. ENSO: El Niño Oscilación del Sur

río Magdalena hacia la cuenca Colombia (Schmidt *et al.*, 2006; Schmidt & Spero, 2011). Esto coincide con evidencias de una profundización del máximo de clorofila y una capa superior del océano menos salada debido a una mayor escorrentía continental (Martínez *et al.*, 2007).

A partir de mediciones en burbujas de aire en núcleos de hielo, se ha reconocido que el CO₂ atmosférico ha oscilado entre los periodos glaciales e interglaciales con valores de 180 a 190 ppmv durante glaciales y ~280 ppmv durante interglaciales (Bradley, 2015). Se considera que durante el LIG los altos niveles de CO₂ en la atmósfera redujeron el [CO₃²⁻] y el pH de las aguas superficiales en el Atlántico Norte, que luego alimentaron la cuenca Caribe profunda. Esto explica la evidencia de un pH más ácido (~7,95) en el Caribe profundo durante el LIG en comparación con los periodos glaciales (~8,10) (Yu *et al.*, 2010). Así, el sistema de carbonatos del Caribe profundo es un reflejo directo de la química de las aguas superficiales e intermedias del Atlántico Norte debido a la rápida ventilación a través de sus umbrales.

La variabilidad milenaria entre el LIG y el LGM parece haber sido modulada por movimientos de la ITCZ en respuesta al enfriamiento del Atlántico Norte, alternando entre un Caribe seco y salino en periodos estadiales fríos y uno más lluvioso y dulce durante los interestadiales cálidos (Martínez *et al.*, 2007; Schmidt & Spero, 2011). Schmidt y Spero (2011) dedujeron de sus registros que el paso del LIG a estadios más fríos (como el MIS 5d, 5c y, finalmente, el MIS 4) se caracterizó por una tendencia general al enfriamiento y un cambio en el balance hidrológico. A medida que el Atlántico Norte se enfriaba, la ITCZ se desplazaba hacia el sur, reduciendo las precipitaciones en el Caribe y aumentando su SSS (Peterson & Haug, 2006). En el nivel del mar la transición del LIG al LGM estuvo

marcada por grandes fluctuaciones en el volumen de las capas de hielo. Durante el MIS 5c y 5a el nivel del mar global alcanzó picos de 9 a 11 metros por debajo del nivel actual, marcando pasos progresivos hacia el mínimo del LGM (**Creveling et al.**, 2017).

Según **Yu et al.** (2010), la transición desde el LIG hacia estadios más fríos marcó un cambio drástico hacia condiciones más básicas de las aguas profundas del Caribe. Esta transición fue impulsada por la reorganización de la circulación oceánica. Las aguas profundas más ácidas de origen sureño fueron reemplazadas por agua intermedia del Atlántico Norte glacial, pobre en nutrientes y rica en carbonatos.

Durante la última glaciación, especialmente en el MIS 3 (57 – 29 ka), el Caribe parece haber experimentado cambios abruptos de escala milenaria vinculados a los ciclos Dansgaard Oeschger (DO) registrados en los hielos de Groenlandia (**Peterson & Haug**, 2006). Los interestadiales (fases cálidas) coincidieron con niveles altos de titanio (Ti) y hierro (Fe) en registros como el de la cuenca de Cariaco, lo que indica un aumento de la lluvia y la escorrentía de los ríos en el norte de Sudamérica. Esto sugiere que la ITCZ se desplazaba hacia el norte durante estos eventos cálidos y las fases frías se caracterizaron por condiciones secas y una reducción del aporte fluvial debido a una posición de la ITCZ más hacia el sur (**Peterson & Haug**, 2006). Se han documentado rápidas oscilaciones de salinidad en el Atlántico Norte subtropical que ocurren en sincronía con estos ciclos milenarios (**Schmidt & Spero**, 2011).

En el clímax de la glaciación (MIS2, hace ~21 ka), el Caribe presentó condiciones extremas. Se han encontrado evidencias de SST en la cuenca Colombia entre 12,1 °C y 2,5 °C más frías que las actuales (**Schmidt et al.**, 2006). La ZCIT se encontraba en una posición mucho más al sur, lo que provocó una fuerte aridez regional y aguas superficiales más saladas (**Martínez et al.**, 2007; **Schmidt & Spero**, 2011). Debido al nivel del mar más bajo, en el Caribe las plataformas continentales estaban expuestas, alterando la entrada de sedimentos y nutrientes a las cuencas profundas (**Mertens et al.**, 2009). **Jickells et al.** (2005), por su parte, propusieron que los flujos de polvo del Sahara fueron entre dos y veinte veces mayores que en la actualidad. Esto pudo coincidir con una producción de agua intermedia del Atlántico Norte glacial fuerte, que alimentó el Caribe profundo, mejorando la preservación de carbonatos (**Yu et al.**, 2010).

Desde el LGM hasta el presente, la cuenca del Caribe ha experimentado variaciones en su temperatura, salinidad y circulación, impulsadas principalmente por cambios en la ITCZ y la AMOC. Los eventos Heinrich H1 (18 – 14,6 ka) y Younger Dryas (YD, ~12,9-11,7 ka) fueron periodos de calentamiento en el hemisferio sur y enfriamiento abrupto en el Atlántico Norte, con un debilitamiento e incluso un colapso de la AMOC, separados por el Bolling-Allerod (BA), un período en el que la AMOC se reforzó unos cientos de años (**Poggemann et al.**, 2017). Registros en la cuenca de Cariaco sugieren un pulso de agua más dulce durante el H1, posiblemente ligado a cambios hidrológicos a gran escala en el Amazonas (**Meckler et al.**, 2007; **Mertens et al.**, 2009). En la cuenca de Cariaco y el norte de Sudamérica, el YD fue extremadamente seco, con una ZCIT al sur y reducción drástica de la descarga de los ríos (**Haug et al.**, 2001; **Williams et al.**, 2010). A pesar de la sequía, la productividad marina en Cariaco aumentó posiblemente debido a una intensificación de la surgencia por los vientos (**Mertens et al.**, 2009). Un aumento en la productividad del Atlántico Norte tropical durante los debilitamientos de la AMOC también ha sido relacionado con la fuente de las aguas intermedias antárticas. El agua profunda circumpolar, rica en nutrientes, domina en periodos que presentan una AMOC débil, como el H1 y el YD. El agua intermedia del Atlántico norte glacial, pobre en nutrientes, domina durante periodos con una AMOC fuerte como el BA (**Poggemann et al.**, 2017).

Haug et al. (2001) encontraron evidencias de que en el Holoceno, durante el óptimo climático o el máximo térmico (11,7-5,4 ka), la ITCZ alcanzó su posición más septentrional, lo que trajo consigo las condiciones más húmedas de los últimos 14 ka al norte de Suramérica y el Caribe. Esto coincide con registros de titanio (Ti) y hierro (Fe) en Cariaco que muestran picos máximos de descarga fluvial (**Peterson & Haug**, 2006). En el Holoceno medio (hace ~5,4 ka) se inició una tendencia de largo plazo hacia

condiciones más secas a medida que la ITCZ comenzó a migrar nuevamente hacia el sur y se establecieron las periodicidades modernas del ENSO (Haug *et al.*, 2001). Los registros de lagunas costeras en Cuba coinciden con la tendencia regional de creciente aridez y un pico de sequía muy pronunciado hace ~1.200 años, lo que coincidió con el colapso Maya (Lane *et al.*, 2009; Gregory *et al.*, 2015). En Belize y Puerto Rico se observa una tendencia de mayor actividad de tormentas y huracanes, vinculada al desplazamiento de la ITCZ y a cambios en la insolación orbital (Schmitt *et al.*, 2025).

Entre los 4,7 y 4 ka se ha documentado un período húmedo en el Caribe (Vélez *et al.*, 2014), con registros, entre otros, en la zona costera de la Guajira (Urrego *et al.*, 2013) y Cariaco (Haug *et al.*, 2001). Después de los 4 ka el clima de la región mostró mayor variabilidad espacial y temporal. Entre los 4 y los 2 ka el clima se volvió más errático y generalmente más seco, en consonancia con la migración hacia el sur de la ITCZ, lo que redujo las lluvias en el norte de Suramérica. Entre los 4 y 3 ka en la Guajira y el Chocó predominaban condiciones húmedas y entre los 3 y 2,5 ka, en la Guajira y la zona de Cartagena se evidenció un cambio hacia la aridez y la reducción de la descarga fluvial (Urrego *et al.*, 2013).

Entre los 2 ka y el presente se retornó a condiciones más húmedas (Vélez *et al.*, 2014). A pesar de la tendencia general de aridez por el desplazamiento de la ZCIT hacia el sur durante el Holoceno tardío, las condiciones húmedas en el Caribe se han explicado por una mayor variabilidad climática y la influencia de fenómenos de escala interanual y decadal que contrarrestaron la tendencia orbital. Por ejemplo, un incremento en la frecuencia e intensidad de eventos del tipo de La Niña (Vélez *et al.*, 2014) y en el paso de tormentas tropicales que se tradujo en un mayor aporte de humedad local (Schmitt *et al.*, 2025), o un cambio hacia un patrón de la NAO frecuentemente negativo durante los últimos 2.000 años (Fischel *et al.*, 2017).

Escalas centenarias en el mar Caribe

En la escala centenaria el mar Caribe y la cuenca Colombia experimentaron variaciones relacionadas con los desplazamientos de la ITCZ, el clima del Atlántico y el ENSO (Figura 5). Durante el período cálido medieval (950 – 1.250 CE, *Medieval Warm Period*, MWP) los registros paleoceanográficos del Caribe suroccidental parecen apoyar la hipótesis de un calentamiento oceánico regional de alrededor de 1 °C con respecto al período anterior (Schmitt *et al.*, 2020). Asimismo, Schmitt *et al.* (2025) documentaron una fase de alta frecuencia de huracanes entre el 900 y el 1.400 d.C., atribuible a las altas temperaturas del Atlántico tropical norte y a condiciones del tipo de La Niña en el Pacífico.

Urrego *et al.* (2013, 2019) encontraron condiciones de sequía o estacionalidad extrema en sitios como las islas del Rosario y la península de la Guajira durante el MWP. Estas condiciones provocaron la contracción de los manglares de *Rhizophora mangle* y su reemplazo por vegetación de marismas o especies más tolerantes a la salinidad como *Avicennia germinans*. Por el contrario, Noncent *et al.* (2023) y Lane *et al.* (2009) identificaron periodos de mayor humedad en el interior de la isla de La Española. Noncent *et al.* (2023) mencionan específicamente que Haití experimentó un MWP predominantemente húmedo, con mayores niveles lacustres y transporte de sedimentos terrígenos. Lane *et al.* (2009) relacionaron este resultado con una posición más septentrional de la ITCZ durante el verano boreal.

Estas diferencias pueden indicar que el MWP no fue uniforme espacial ni temporalmente. En Haití, Noncent *et al.* (2023) dividieron el periodo en dos fases, la primera entre el 1.000 y el 1.050 CE, fue seca y con alta evaporación, y la segunda, entre el 1.050 y el 1.150 CE, fue húmeda. Igualmente, Lane *et al.* (2009) identificaron una tendencia hacia condiciones húmedas a partir del 1.060 CE, después de un periodo previo de aridez. Sin embargo, el registro de titanio de la cuenca de Cariaco (Venezuela), usado a menudo como estándar regional, muestra una disminución (lo que indica sequía) entre el 1.050 y el 1.200 CE.

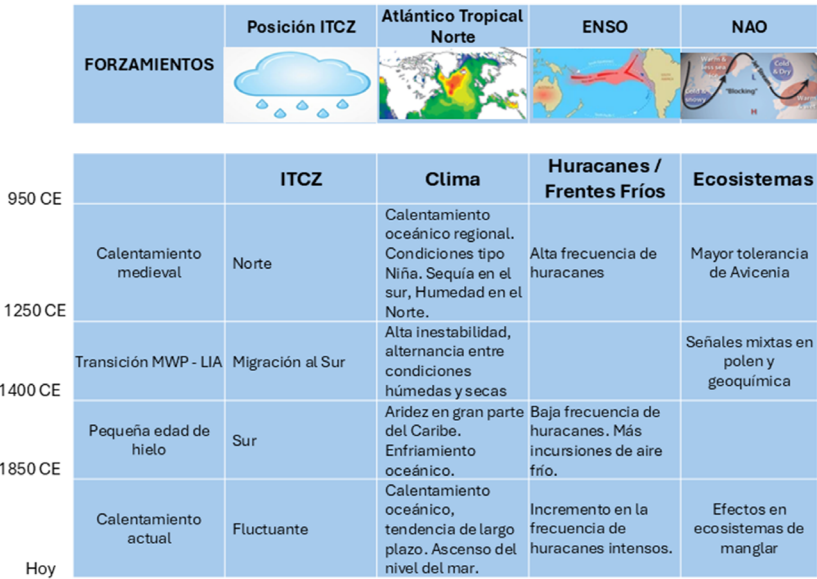


Figura 5. Resumen conceptual de la variabilidad climática del mar Caribe durante el último milenio. ITCZ: zona de convergencia intertropical. ENSO: El Niño Oscilación del Sur. NAO: Oscilación del Atlántico Norte. MWPÑ: periodo de calentamiento medieval. LIA= Pequeña Edad de Hielo.

El periodo de transición entre el MWP y la Pequeña Edad de Hielo (aprox. 1.250 - 1.400 CE; *Little Ice Age*, LIA) se considera una época de gran inestabilidad climática. Durante este intervalo hubo alternancias bruscas entre condiciones húmedas y secas, lo que genera señales mixtas en los registros polínicos y geoquímicos dependiendo de la sensibilidad local del sitio (Noncent *et al.*, 2023). La LIA (aprox. 1 400 - 1.850 CE) se considera un periodo árido en el Caribe, con niveles de precipitación mínimos en Cariaco y una ITCZ posicionada al sur. Registros de corales en Puerto Rico indican que durante los intervalos más fríos de la LIA (como el Mínimo de Maunder, 1.645-1.715 CE), las temperaturas del mar eran entre 2 y 3 °C más frías que en la actualidad (Winter *et al.*, 2000). Se ha propuesto que este enfriamiento resultó de una extensión hacia el sur de la vaguada de América del Norte, permitiendo incursiones más frecuentes de masas de aire frío de latitudes medias hacia el Caribe (Winter *et al.*, 2000).

Aunque generalmente se considera una época seca en gran parte del Caribe (por ejemplo, en Haití y la península de Yucatán) (Noncent *et al.*, 2023), algunos registros en el suroeste (por ejemplo, en la isla de San Andrés) (González *et al.*, 2010) sugieren condiciones más húmedas hacia el final de este periodo (1.700-1.850 CE). En general, las respuestas de la vegetación a la LIA en el Caribe parecen haber variado regionalmente (Urrego *et al.*, 2019). En cuanto a la actividad ciclónica, la LIA fue un periodo de relativa calma, con una frecuencia de huracanes por debajo del promedio (Schmitt *et al.*, 2025).

Desde el inicio de la Revolución Industrial (1.800 CE), en el periodo de calentamiento actual (*current warming period*, CWP), se ha encontrado una tendencia al aumento de la SST en el Caribe suroccidental de aproximadamente 1,3 °C, confirmado por varios registros regionales (Schmitt *et al.*, 2020). Cetina-Heredia y Allende-Arandia (2023) encontraron que en los últimos 40 años (1982 - 2021) ha habido una tendencia positiva de largo plazo en la SST del mar Caribe, con un aumento de 0,23° por década. Espacialmente, una de las zonas con mayor tendencia al calentamiento en este período fue la costa norte de Suramérica. Asimismo, se ha documentado un incremento abrupto en la frecuencia de huracanes, con niveles de actividad que superan la variabilidad natural observada en los últimos 5.000 años y atribuida al aumento en la temperatura superficial de la región de desarrollo principal de los huracanes (Schmitt *et al.*, 2025).

En cuanto al aumento del nivel del mar, **Torres y Tsimplis (2013)** encontraron valores entre 1,2 y 1,6 mm a⁻¹ en Cristobal (Panamá), La Guaira (Venezuela) y Magueyes (Puerto Rico), mientras que en Cartagena (Colombia), los valores de 5,3 mm a⁻¹ pueden explicarse por los movimientos verticales terrestres. En las costas colombianas se ha encontrado que la respuesta de los ecosistemas de manglar a este ascenso del nivel del mar depende de los aportes fluviales y la exposición a la erosión, con casos como el de Cispatá, donde los manglares se expandieron y migraron tierra adentro (**Castaño et al., 2010**), y el de islas del Rosario, donde ha ocurrido una pérdida neta de vegetación (**Urrego et al., 2019**).

Variabilidad decadal y multidecadal

La variabilidad decadal (ciclos entre 8 y 14 años) y multidecadal (ciclos entre 30 y 90 años) en la cuenca Colombia y el mar Caribe está gobernada por la interacción de diversos modos climáticos, siendo los más destacados la Oscilación Multidecadal del Atlántico (*Atlantic Multidecadal Oscillation*, AMO), la Oscilación Decadal del Pacífico (*Pacific Decadal Oscillation*, PDO) y la Oscilación del Atlántico Norte (*North Atlantic Oscillation*, NAO) (**Cheng et al., 2018**). La **Figura 6** presenta un resumen de las oscilaciones que gobiernan la variabilidad a estas escalas, sus mecanismos de transmisión y las respuestas del Caribe.

En el Caribe oriental (Puerto Rico, Antillas menores, Venezuela y Trinidad) se ha identificado una oscilación decadal de 10 a 12 años como el modo principal de variabilidad de la lluvia en el siglo 20, que se ha fortalecido desde 1970 (**Jury & Gouirand, 2011**). Las fases húmedas se asocian con SST **cálidas en la zona de los vientos alisios del Atlántico**, una presión más baja sobre el Atlántico Norte y SST frías y alta presión sobre el Pacífico Oriental y el Atlántico Sur. Una menor presión sobre el Atlántico Norte contribuye a menores tasas de evaporación y a una SST **más alta en la región**, frecuentemente atravesada por ondas del este africanas (**Jury & Gouirand, 2011**). Asimismo, los registros estacionales de SST en la cuenca de Cariaco muestran una varianza en bandas decadales de 11 a 13 años, asociadas con fluctuaciones en el gradiente de la temperatura superficial transecuatorial del Atlántico (**Wurtzel et al., 2013**).

Con base en registros de corales en el archipiélago Los Roques (Caribe suroriental), **Hetzinger et al. (2008)** han señalado que en esa región tanto la SST como la SSS están moduladas por fluctuaciones multidecadales pronunciadas, con un periodo cercano a los 60 años, asociadas con la AMO. La presencia de aguas más cálidas y menos salinas coincide con una mayor precipitación en estas escalas, lo que a su vez se relaciona con la



Figura 6. Modos climáticos involucrados en la variabilidad decadal y multidecadal del mar Caribe (fila superior); fenómenos físicos que conectan los fenómenos macroclimáticos con el mar Caribe (mecanismos de transmisión, fila central) y conjunto de variables y fenómenos de océano y clima que son afectados por la variabilidad decadal y multidecadal en el Caribe (respuestas, fila inferior). AMO: Oscilación Multidecadal del Atlántico. PDO: Oscilación Decadal del Pacífico. IPO: Oscilación Interdecadal del Pacífico. NAO: Oscilación del Atlántico Norte. ENSO: El Niño Oscilación del Sur. AMOC: circulación meridional cíclica del Atlántico. SST: temperatura superficial del mar. SSS: salinidad superficial del mar. MDR: Región principal de desarrollo de huracanes. ITCZ: zona de convergencia intertropical.

SST y la cizalladura vertical del viento en la región de desarrollo de huracanes a través de la ITCZ (**Hetzinger et al.**, 2008). En el registro de **Wurtzel et al.** (2013) de la SST estacional en Cariaco también se encontraron ciclos multidecadales de 50 a 90 años, que los autores no pudieron relacionar directamente con la AMO, pero que atribuyeron a variaciones en la AMOC.

En Belize, **Schmitt et al.** (2020) demostraron que la AMO es un factor del control multidecadal de la SST en el Caribe a lo largo de toda la era común, es decir, los últimos 2.000 años. **Cetina-Heredia y Allende-Arandía** (2023) encontraron un aumento en la frecuencia y duración de las MHW después de 1995, coincidente con un cambio en la AMO y otros índices similares que despliegan una variabilidad multidecadal en el Atlántico. Igualmente, las fases cálidas de la AMO parecen coincidir con periodos de alta actividad de huracanes en el Caribe y fases frías (como entre 1970 y 1994) de actividad reducida (**Hetzinger et al.**, 2008). Según **Golderberg et al.** (2001), el número total de tormentas tropicales y huracanes menores no varía interdecadalmente, pero el número de huracanes mayores sí.

En las islas del Rosario (cuenca Colombia) se encontraron cordones de playa formados por tormentas con periodos de recurrencia cercanos a 70 años (**Puerres et al.**, 2018). No es claro, sin embargo, si esta frecuencia coincide con la variabilidad multidecadal de los huracanes. Los mayores eventos de vientos y olas en la región se han relacionado con frentes fríos y el CLLJ y no con huracanes (**Torres & Tsimplis**, 2014; **Devis-Morales et al.**, 2017). Asimismo, los mayores eventos de ascenso del nivel del mar han ocurrido durante la estación húmeda en eventos de El Niño (**Puerres et al.**, 2018).

También en las islas del Rosario, **Urrego et al.** (2019) encontraron ciclos multidecadales en registros de polen, lo que se relaciona con períodos más húmedos o secos. Los manglares estuvieron dominados por *Rizophora* durante los períodos húmedos y por *Laguncularia* durante los períodos secos. Las frecuencias multidecadales dominantes durante la LIA (1610-1862 CE) fueron de 64 años y entre 1866 y 1954 CE, de 32 años. La mejor correlación de la serie temporal de *Rhizophora* con índices climáticos se encontró con la PDO y el ENSO (**índices basados en el Pacífico**) y con la AMO (**índice basado en el Atlántico**). Los autores mencionan que es posible que el Caribe suroccidental presente una mayor influencia basada en el Pacífico que el resto del Caribe, teniendo en cuenta que la variabilidad interdecadal de la Oscilación del Atlántico Norte (AMO) está altamente conectada con la variabilidad interdecadal del océano Pacífico (PDO) a través de las migraciones de la ZCIT (**Green et al.**, 2017).

El impacto de la Oscilación Decadal del Pacífico (PDO) en la cuenca Colombia y el Caribe se manifiesta principalmente a través de la redistribución del calor oceánico y la modulación de otros fenómenos climáticos como el ENSO. En ciclos largos la PDO opera en escalas de tiempo de 30 a 70 años, una duración similar a la de la AMO, lo cual dificulta su estudio preciso (**Cheng et al.**, 2018). Los cambios en la PDO pueden alterar la teleconexión de ENSO hacia el Caribe, así, la respuesta local de las condiciones húmedas, forzadas localmente por anomalías cálidas de la SST, podría contrastarse con la divergencia superficial forzada remotamente desde el Pacífico (**Giannini et al.**, 2001).

Se ha determinado que la Oscilación Interdecadal del Pacífico (*Interdecadal Pacific Oscillation*, IPO), estrechamente ligada a la PDO, es uno de los motores naturales que impulsan las fluctuaciones en la frecuencia de ciclones tropicales en el Atlántico y el Caribe (**Schmitt et al.**, 2025). Por lo tanto, se sugiere que los patrones de frecuencia de huracanes no dependen de un solo modo, sino de una combinación en la que la PDO/IPO interactúa con la AMO y la radiación solar para crear periodos de mayor o menor actividad.

El impacto de la NAO en la cuenca Colombia y el mar Caribe se manifiesta principalmente a través de su control sobre el sistema de alta presión del Atlántico Norte, lo que modula los vientos alisios, las temperaturas oceánicas y los patrones de lluvia de la región (**Giannini et al.**, 2001). Existe una correlación negativa entre la fase de la NAO y las lluvias en el Caribe. Además, la NAO juega un papel crítico en modular cómo El Niño afecta al Caribe amplificando o cancelando sus efectos (**Giannini et al.**, 2001). La NAO

también influye en los patrones de largo plazo de la actividad de los ciclones tropicales en el Atlántico (**Schmitt et al.**, 2020). Además, influye en el transporte de polvo del Sahara hacia la región del Caribe, ya que una anomalía positiva persistente de la NAO fortalece los vientos alisios (**Schmitt et al.**, 2020).

Discusión

La **Tabla 1S**, <https://raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/4102/5426>, es una síntesis de la interacción de cada una de las escalas temporales estudiadas en el mar Caribe y su relación con la variabilidad interanual, estacional y los eventos extremos. En conjunto, esta síntesis sugiere que el clima regional en el Caribe es el resultado de la superposición de señales de largo plazo (cambios glaciales e interglaciales, eventos de tipo YD, el Holoceno medio o tardío, MWP y LIA) con modos de variabilidad más cortos (AMO, NAO, ENSO, estacionalidad y la ocurrencia de huracanes, sequías y olas de calor marinas).

Las escalas decadales y multidecadales parecen actuar como moduladoras claves de la variabilidad climática caribeña. La AMO ha controlado la temperatura superficial del mar en el Caribe durante buena parte de la era común, pero su expresión puede fortalecerse, debilitarse o incluso desaparecer, dependiendo del estado climático de fondo. Esto sugiere que modos como la AMO no operan de manera constante en el tiempo, sino que su influencia depende de condiciones más amplias, siendo más activa en periodos interestadiales (cálidos), es decir, interglaciales, fases cálidas de los ciclos DO, la era común o el MWP (**Schmitt et al.**, 2020; **Hertzberg et al.**, 2012; **Li et al.**, 2013; **Urrego et al.**, 2019).

También se observa que la variabilidad interanual asociada con el ENSO no actúa de manera aislada. Las periodicidades actuales del ENSO se establecieron en el Holoceno medio (**Haug et al.**, 2001). Su efecto sobre las lluvias del Caribe puede cambiar en escalas interdecadales dependiendo del estado de la NAO: por ejemplo, una NAO positiva durante inviernos con El Niño puede reforzar la señal seca en verano y modificar la señal húmeda esperada en primavera (**Giannini et al.**, 2001). Esta relación indica que el impacto del ENSO en el Caribe no puede interpretarse únicamente desde el Pacífico tropical, sino que debe entenderse dentro de un sistema acoplado de Pacífico, Atlántico y Caribe.

La estacionalidad también cambia bajo la influencia de escalas más largas. La tabla señala que durante ciertos periodos hubo mayor calentamiento en verano, mayor enfriamiento en invierno y una ampliación del intervalo estacional (**Giannini et al.**, 2001; **Jury & Gouirand**, 2011; **Wurtzel et al.**, 2013; **Brocas et al.**, 2016; **Williams et al.**, 2025; **Schmitt et al.**, 2020). Esto implica que los cambios climáticos no solo modifican los valores medios de temperatura, precipitación o productividad, sino también la amplitud entre estaciones.

Los eventos extremos también responden a la interacción entre escalas. La frecuencia de huracanes, sequías y olas de calor marinas parece variar en relación con fases cálidas o frías de la AMO, cambios en la NAO, condiciones ENSO y el CWP (**Golderberg et al.**, 2001; **Hetzinger et al.**, 2008; **Cetina-Heredia & Allende-Arandía**, 2023; **Schmitt et al.**, 2025). Esto indica que los extremos climáticos no son anomalías independientes, sino expresiones intensificadas de estados climáticos regionales modulados por forzamientos de mayor escala. En ese sentido, entender la variabilidad de fondo es fundamental para interpretar cuándo y por qué ciertos extremos se vuelven más frecuentes, más intensos o persistentes.

Todavía se deben dilucidar algunos aspectos de la variabilidad de océano y clima en el Caribe. Faltan detalles sobre la forma en que cambian las relaciones entre escalas a través del tiempo. Por ejemplo, no es claro cómo el ENSO se acopla a los periodos estadales e interestadiales. Si bien durante el MWP dominaron condiciones del tipo de La Niña, no hay información clara sobre su homólogo frío (LIA). También hay vacíos sobre la estacionalidad en algunas escalas milenarias y centenarias. Falta determinar qué señales son verdaderamente regionales del Caribe y cuáles son expresiones locales de procesos más amplios del Atlántico tropical, el Atlántico Norte o el Pacífico tropical. Por último, hace falta entender mejor los mecanismos físicos que conectan estas escalas.

En cuanto a la cuenca Colombia, el vacío es aún más importante. Muchas de las inferencias provienen de otras zonas. Por eso, se requieren reconstrucciones paleoceanográficas de alta resolución que permitan evaluar si los patrones observados en otras regiones del Caribe también se expresan en la cuenca Colombia, con qué intensidad y en qué condiciones climáticas.

El trabajo de **Martínez et al.** (2007) generó un conocimiento de las interacciones entre océano y clima de la cuenca Colombia en escalas milenarias, el cual es fundamental para entender las conexiones de la cuenca Colombia con el mar Caribe y el Atlántico. Asimismo, los periodos de humedad y sequía a escala milenaria en el Caribe se han reconstruido con bastante detalle. Muchas de estas reconstrucciones se pueden extender a la cuenca Colombia. Específicamente para el Holoceno se han hecho estudios en la cuenca (**Urrego et al.**, 2013; **Vélez et al.**, 2014) que muestran variaciones entre registros, especialmente en los últimos 5.000 años, y que hace falta entender mejor. A escala centenaria no hay uniformidad espacial ni temporal en los registros de la cuenca del Caribe. En este marco, hace falta generar un modelo que explique las diferencias entre la cuenca Colombia y otras regiones del Caribe. Por último, a escala decadal y multidecadal el trabajo de **Urrego et al.** (2019) evidenció variaciones en la humedad de la cuenca Colombia relacionadas con la PDO, el ENSO y la AMO. Se requieren más registros en la cuenca Colombia que permitan identificar la continuidad espacial de estas escalas y compararlas de forma más detallada con otros sectores del Caribe y el Atlántico Norte.

Se debe profundizar en aspectos como la variabilidad decadal a milenaria del transporte meridional de agua y calor por la CC, el PCG, la surgencia de la Guajira, los remolinos de mesoescala, la llegada de la capa de aire del Sahara y la respuesta de la salinidad superficial al balance entre la precipitación, la evaporación y los aportes de aguas dulces continentales. Si bien en el mar Caribe hay estudios que relacionan los huracanes con escalas decadales y centenarias de variabilidad climática y en la cuenca Colombia hay signos de marejadas en los ciclos decadales (**Puerres et al.**, 2018), no es claro si los eventos extremos que producen esta variabilidad decadal en la esquina suroccidental del Caribe están relacionados con huracanes, frentes fríos o efectos estéricos. Otro aspecto poco estudiado en la cuenca Colombia en todas las escalas de tiempo son las olas de calor marinas y su relación con las que ocurren en el resto del Caribe.

Si bien esta revisión integradora permitió esbozar una historia común de la relación de océano y el clima en el mar Caribe y la cuenca Colombia, e identificar aspectos por complementar en investigaciones futuras, hay limitaciones que deben tenerse en cuenta: 1) las limitaciones metodológicas y comparativas de los registros revisados; 2) el nivel de certeza de cada contribución, y 3) el peso relativo de cada forzamiento.

Los registros incluidos en esta revisión difieren en cuanto al tipo de archivo natural utilizado, la resolución temporal, la duración del registro, los indicadores analizados, la robustez de los modelos geocronológicos y la sensibilidad ambiental de cada sitio. Por lo tanto, las comparaciones entre registros deben entenderse como aproximaciones regionales y no como correlaciones directas entre series equivalentes. Por ejemplo, una aparente discrepancia entre registros puede reflejar diferencias en la sensibilidad del indicador utilizado, en lugar de una verdadera contradicción climática. Otra limitación importante es la diferencia entre registros marinos, costeros, lacustres, coralinos e instrumentales. Cada uno tiene ventajas y sesgos propios. En consecuencia, las síntesis presentadas en este trabajo deben interpretarse como una integración crítica de patrones generales y no como una correlación cronológica estricta entre todos los registros. Las coincidencias entre archivos de distinta naturaleza fortalecen la interpretación regional, especialmente cuando múltiples indicadores apuntan hacia cambios coherentes. En cambio, las diferencias entre registros no deben verse necesariamente como contradicciones, sino como evidencia de respuestas locales, de la sensibilidad diferencial de los indicadores, las incertidumbres cronológicas o la variabilidad espacial dentro del Caribe.

Una limitación adicional de esta revisión es la dificultad de distinguir, en todos los casos, entre relaciones bien respaldadas por evidencia empírica directa, inferencias

regionales sustentadas por coherencia entre registros y mecanismos físicos conocidos, e hipótesis que requieren validación mediante nuevos registros, análisis estadísticos o modelación climática. Esta distinción es importante porque el clima del Caribe resulta de la interacción entre múltiples forzamientos, escalas temporales y procesos locales. En consecuencia, las relaciones entre forzamientos y respuestas climáticas discutidas aquí deben interpretarse como asociaciones consistentes con la literatura revisada, pero no como atribuciones causales cuantificadas.

Por último, el peso relativo de cada forzamiento no es constante en el tiempo ni en el espacio, sino que cambia según la escala temporal, la variable analizada, el tipo de registro y la región del Caribe considerada. En el ejercicio que se hizo, estimar el peso relativo de cada forzamiento sobrepasa el alcance propuesto. Sin embargo, este es un elemento fundamental para abordar en futuras aproximaciones sobre la variabilidad de océano y clima del mar Caribe y la cuenca Colombia.

Conclusiones

En esta revisión integradora se elaboraron síntesis críticas de patrones generales del océano y el clima en el mar Caribe y la cuenca Colombia. Si bien se pudo construir una historia integrada e identificar vacíos de conocimiento, esta aproximación tiene limitaciones importantes que deben ser tenidas en cuenta para futuras investigaciones.

La variabilidad de océano y clima en el mar Caribe durante los últimos 125.000 años es el resultado de la interacción entre múltiples escalas temporales. Los cambios orbitales, la dinámica de la AMOC, los desplazamientos de la ITCZ y los modos de variabilidad interanual, decadal y multidecadal se superponen y modulan entre sí, generando respuestas regionales complejas.

A escala milenaria, los registros disponibles muestran una alternancia entre condiciones relativamente cálidas y húmedas durante fases interestadiales y condiciones más frías, áridas y salinas durante fases estadales. En este marco, el LIG, el LGM, los eventos Dansgaard–Oeschger, Heinrich y Younger Dryas, así como el Holoceno, representan estados climáticos contrastantes que permiten evaluar la sensibilidad del Caribe tropical a los cambios en la circulación del Atlántico, la posición de la ITCZ y el balance hidrológico regional.

A escala centenaria, el calentamiento medieval, la Pequeña Edad de Hielo y el período de calentamiento actual muestran que la respuesta climática del Caribe no ha sido espacialmente uniforme. Mientras algunos registros indican condiciones secas, enfriamiento o contracción de ecosistemas costeros, otros muestran fases húmedas o respuestas locales contrastantes. Esta heterogeneidad evidencia la necesidad de interpretar cada registro dentro de su contexto oceanográfico, geomorfológico e hidroclimático particular.

Las escalas decadales y multidecadales actúan como moduladoras fundamentales de la variabilidad regional. La AMO, la NAO, la PDO y el ENSO influyen en la temperatura superficial del mar, la precipitación, la salinidad, la frecuencia de huracanes, las marejadas, las olas de calor marinas y la dinámica de ecosistemas costeros como los manglares. Sin embargo, estas relaciones no son constantes en el tiempo, sino que dependen del estado climático de fondo y de la interacción entre el Atlántico tropical, el Atlántico Norte, el Pacífico tropical y el Caribe.

La cuenca Colombia ocupa una posición estratégica para estudiar las conexiones entre el Atlántico tropical, el mar Caribe, el norte de Suramérica y el Pacífico. Su oceanografía la convierte en una región especialmente sensible a cambios climáticos de diferente escala. No obstante, gran parte de las inferencias sobre su variabilidad de largo plazo provienen de registros ubicados en otras regiones del Caribe.

Entre los vacíos de conocimiento se pueden destacar algunas relaciones entre escalas a través del tiempo, la diferenciación entre señales locales, regionales y hemisféricas, los mecanismos físicos que conectan las escalas y la escasez de registros específicos para la cuenca Colombia.

Información suplementaria

Ver la información suplementaria en <https://raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/4102/5426>

Agradecimientos

La autora expresa su agradecimiento a la Universidad Nacional de Colombia y a los autores de los artículos científicos usados en esta revisión y un agradecimiento especial a los coautores de los artículos en los que ella participó y que fueron incluidos.

Conflicto de intereses

La autora declara no tener intereses financieros ni relaciones personales que pudieran haber influido en el trabajo presentado en este artículo, como tampoco afectar la transparencia u objetividad del proceso de revisión por pares y publicación.

Declaración sobre el uso de IA generativa y tecnologías asistidas por IA en el proceso de escritura

Durante la preparación de este trabajo, la autora utilizó CHATGPT y NotebookLM para mejorar la redacción y la claridad del lenguaje y procesar y sintetizar grandes volúmenes de información. Posteriormente, la autora revisó y editó el contenido según fue necesario, y asume la responsabilidad total por el contenido de la publicación.

Referencias

- Alvera-Azcárate, A., Barth, A., Weisberg, R. H. (2009). The surface circulation of the Caribbean Sea and the Gulf of Mexico as inferred from satellite altimetry. *Journal of Physical Oceanography*, 39, 640-657.
- Alverson, K. D., Pedersen, T. F., Bradley, R. S. (Eds.). (2003). *Paleoclimate, global change and the future*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-05158-6>
- Andrade, C. A., Barton, E. D., Mooers, C. N. K. (2003). Evidence for an eastward flow along the Central and South American Caribbean coast. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 108(C6), 3185. <https://doi.org/10.1029/2002JC001549>
- Andrade, C. A. & Barton, E. D. (2005). The Guajira upwelling system. *Continental Shelf Research*, 25, 1003–1022. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2004.12.012>
- Beier, E., Bernal, G., Ruiz-Ochoa, M., Barton, E. D. (2017). Freshwater exchanges and surface salinity in the Colombian Basin, Caribbean Sea. *PLoS ONE*, 12(8), e0182116.
- Bernal, G., Osorio, A. F., Urrego, L., Peláez, D., Molina, E., Zea, S., Montoya, R. D., Villegas, N. (2016). Occurrence of energetic extreme oceanic events in the Colombian Caribbean coasts and some approaches to assess their impact on ecosystems. *Journal of Marine Systems*, 164, 85-100. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2016.08.007>
- Bradley, R. S. (2015). *Paleoclimatology: Reconstructing climates of the Quaternary* (3rd ed.). Academic Press.
- Brocas, W. M., Felis, T., Obert, J. C., Gierz, P., Lohmann, G., Scholz, D., Kölling, M., Scheffers, S. R. (2016). Last interglacial temperature seasonality reconstructed from tropical Atlantic corals. *Earth and Planetary Science Letters*, 449, 418-429. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2016.06.005>
- Castaño, A. R., Urrego, L. E., Bernal, G. R. (2010). Dinámica del manglar en el complejo lagunar de Cispatá (Caribe colombiano) en los últimos 900 años. *Revista de Biología Tropical*, 58, 1347-1366.
- Centurioni, L. R. & Nüller, P. P. (2003). On the surface currents of the Caribbean Sea. *Geophysical Research Letters*, 30(6), 1279. <https://doi.org/10.1029/2002GL016231>
- Cetina-Heredia, P. & Allende-Arandía, M. E. (2023). Caribbean marine heatwaves, marine cold spells, and co-occurrence of bleaching events. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 128, e2023JC020147. <https://doi.org/10.1029/2023JC020147>
- Cheng, L., Wang, G., Abraham, J. P., Huang, G. (2018). Decadal ocean heat redistribution since the late 1990s and its association with key climate modes. *Climate*, 6, 91. <https://doi.org/10.3390/cli6040091>

- Chérubin, L. M. & Richardson, P. L.** (2007). Caribbean current variability and the influence of the Amazon and Orinoco freshwater plumes. *Deep-Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 54, 1451-1473.
- Cook, K. & Vizy, E.** (2010). Hydrodynamics of the Caribbean low-level jet and its relationship to precipitation. *Journal of Climate*, 23(6), 1477-1494. <https://doi.org/10.1175/2009JCLI3210.1>
- Correa-Ramírez, M., Rodríguez-Santana, Á., Ricaurte-Villota, C., Páramo, J.** (2020). The southern Caribbean upwelling system off Colombia: Water masses and mixing processes. *Deep-Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 155, 103145. <https://doi.org/10.1016/j.dsr.2019.103145>
- Creveling, J. R., Mitrovica, J. X., Clark, P. U., Waelbroeck, C., Pico, T.** (2017). Predicted bounds on peak global mean sea level during marine isotope stages 5a and 5c. *Quaternary Science Reviews*, 163, 193-208. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2017.03.003>
- Deser, C., Alexander, M. A., Xie, S.-P., Phillips, A. S.** (2010). Sea surface temperature variability: Patterns and mechanisms. *Annual Review of Marine Science*, 2, 115-143. <https://doi.org/10.1146/annurev-marine-120408-151453>
- Devis-Morales, A., Montoya-Sánchez, R. A., Bernal, G., Osorio, A. F.** (2017). Assessment of extreme wind and waves in the Colombian Caribbean Sea for offshore applications. *Applied Ocean Research*, 69, 10-26. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2017.09.012>
- Fischel, A., Seidenkrantz, M.-S., Nürnberg, D., Kucera, M., Kuijpers, A.** (2017). Upper water mass variability in the Anegada–Jungfern Passage, NE Caribbean, during the last 11,100 cal. yr. *The Holocene*, 27(9), 1291-1307. <https://doi.org/10.1177/0959683616687378>
- Fratantoni, D. M.** (2001). North Atlantic surface circulation during the 1990s observed with satellite-tracked drifters. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 106(C10), 22,067-22,093.
- Giannini, A., Cane, M. A., Kushnir, Y.** (2001). Interdecadal changes in the ENSO teleconnection to the Caribbean region and the North Atlantic Oscillation. *Journal of Climate*, 14(13), 2867-2879. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2001\)014](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2001)014)
- Goldenberg, S. B., Landsea, C. W., Mestas-Núñez, A. M., Gray, W. M.** (2001). The recent increase in Atlantic hurricane activity: Causes and implications. *Science*, 293(5529), 474-479. <https://doi.org/10.1126/science.1060040>
- Gómez-Gaspar, A. & Acero P., A.** (2020). Comparación de las surgencias de la Guajira colombiana y del oriente venezolano. *Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras*, 49(2), 131-172. <https://doi.org/10.25268/bimc.invemar.2020.49.2.943>
- González, C., Urrego, L. E., Martínez, J. I., Polanía, J., Yokoyama, Y.** (2010). Mangrove dynamics in the southwestern Caribbean since the “Little Ice Age”: A history of human and natural disturbances. *The Holocene*, 20, 849-861. <https://doi.org/10.1177/0959683610365942>
- González-Dumar, A., Bernal, G., Vélez-Upegui, J. I.** (2023). Transporte de humedad entre el mar Caribe, el Pacífico tropical oriental y el norte de Suramérica y sus consecuencias en la salinidad superficial del mar. *Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras*, 52(2), 57-76. <https://doi.org/10.25268/bimc.invemar.2023.52.2.1205>
- Green, B., Marshall, J., Donohoe, A.** (2017). Twentieth century correlations between extratropical SST variability and ITCZ shifts. *Geophysical Research Letters*, 44, 9039-9047. <https://doi.org/10.1002/2017GL075044>
- Gregory, B. R. B., Peros, M., Reinhardt, E. G., Donnelly, J. P.** (2015). Middle–late Holocene Caribbean aridity inferred from foraminifera and elemental data in sediment cores from two Cuban lagoons. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 426, 229-241. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2015.02.029>
- Grodsky, S. A., Johnson, B. K., Carton, J. A., Bryan, F. O.** (2015). Interannual Caribbean salinity in satellite data and model simulations. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 120, 1375-1387.
- Haug, G. H., Hughen, K. A., Sigman, D. M., Peterson, L. C., Röhl, U.** (2001). Southward migration of the Intertropical Convergence Zone through the Holocene. *Science*, 293(5533), 1304-1307. <https://doi.org/10.1126/science.1059725>
- Hernández-Ayala, J. J. & Méndez-Tejeda, R.** (2024). Analyzing trends in Saharan dust concentration and its relation to Sargassum blooms in the eastern Caribbean. *Oceans*, 5, 637-646. <https://doi.org/10.3390/oceans5030036>
- Hertzberg, J. E., Black, D. E., Peterson, L. C., Thunell, R. C., Haug, G. H.** (2012). Decadal-to centennial-scale tropical Atlantic climate variability across a Dansgaard–Oeschger cycle. *Paleoceanography*, 27, PA3218. <https://doi.org/10.1029/2011PA002251>

- Hetzinger, S., Pfeiffer, M., Dullo, W.-C., Keenlyside, N., Latif, M., Zinke, J. (2008). Caribbean coral tracks Atlantic Multidecadal Oscillation and past hurricane activity. *Geology*, 36(1), 11-14. <https://doi.org/10.1130/G24321A.1>
- Hidalgo, H., Durán-Quesada, A. M., Amador, J. A., Alfaro, E. J. (2015). The Caribbean low-level jet, the Inter-Tropical Convergence Zone and precipitation patterns in the Intra-Americas Sea: A proposed dynamical mechanism. *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography*, 97(1).
- Hobday, A. J., Alexander, L. V., Perkins, S. E., Smale, D. A., Straub, S. C., Oliver, E. C. J., Benthuisen, J. A., Burrows, M. T., Donat, M. G., Feng, M., Holbrook, N. J., Moore, P. J., Scannell, H. A., Sen Gupta, A., Wernberg, T. (2016). A hierarchical approach to defining marine heatwaves. *Progress in Oceanography*, 141, 227-238. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2015.12.014>
- Hoyos, I., Martínez, F., Domínguez, R., Nieto, R. (2018). Moisture origin and transport processes in Colombia, northern South America. *Climate Dynamics*, 50. <https://doi.org/10.1007/s00382-017-3653-6>
- Hu, C., Montgomery, E. T., Schmitt, R. W., Müller-Karger, F. E. (2004). The dispersal of the Amazon and Orinoco River water in the tropical Atlantic and Caribbean Sea: Observations from space and S-PALACE floats. *Deep-Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 51, 1151-1171.
- Jickells, T. D., An, Z. S., Andersen, K. K., Baker, A. R., Bergametti, G., Brooks, N., Cao, J. J., Boyd, P. W., Duce, R. A., Hunter, K. A., Kawahata, H., Kubilay, N., LaRoche, J., Liss, P. S., Mahowald, N., Prospero, J. M., Ridgwell, A. J., Tegen, I., Torres, R. (2005). Global iron connections between desert dust, ocean biogeochemistry, and climate. *Science*, 308(5718), 67-71. <https://doi.org/10.1126/science.1105959>
- Jouanno, J., Sheinbaum, J., Barnier, B., Molines, J.-M., Debreu, L., Lemarié, F. (2008). The mesoscale variability in the Caribbean Sea. Part I: Simulations and characteristics with an embedded model. *Ocean Modelling*, 23, 82-101.
- Jury, M. R. & Gouirand, I. (2011). Decadal climate variability in the eastern Caribbean. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 116, D00Q03. <https://doi.org/10.1029/2010JD015107>
- Kumar, A., Abouchami, W., Galer, S. J. G., Singh, S. P., Fomba, K. W., Prospero, J. M., Andreae, M. O. (2018). Seasonal radiogenic isotopic variability of the African dust outflow to the tropical Atlantic Ocean and across to the Caribbean. *Earth and Planetary Science Letters*, 487, 94-105. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2018.01.025>
- Lane, C. S., Horn, S. P., Mora, C. I., Orvis, K. H. (2009). Late-Holocene paleoenvironmental change at mid-elevation on the Caribbean slope of the Cordillera Central, Dominican Republic: A multi-site, multi-proxy analysis. *Quaternary Science Reviews*, 28(23-24), 2239-2260. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2009.05.010>
- Li, R. C. Y. & Zhou, W. (2018). Revisiting the intraseasonal, interannual and interdecadal variability of tropical cyclones in the western North Pacific. *Atmospheric and Oceanic Science Letters*, 11(2), 198-208. <https://doi.org/10.1080/16742834.2018.1459460>
- López-Álzate, M. E., Sayol, J.-M., Hernández-Carrasco, I., Osorio, A. F., Mason, E., Orfila, A. (2022). Mesoscale eddy variability in the Caribbean Sea. *Ocean Dynamics*, 72, 679-693. <https://doi.org/10.1007/s10236-022-01525-9>
- Martínez, J. I., Mora, G., Barrows, T. T. (2007). Paleooceanographic conditions in the western Caribbean Sea for the last 560 kyr as inferred from planktonic foraminifera. *Marine Micropaleontology*, 64(3-4), 177-188. <https://doi.org/10.1016/j.marmicro.2007.04.004>
- Martins, M. S. & Stammer, D. (2015). Pacific Ocean surface freshwater variability underneath the double ITCZ as seen by satellite sea surface salinity retrievals. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 120, 5870-5885. <https://doi.org/10.1002/2015JC010895>
- Meckler, A. N., Haug, G. H., Sigman, D. M., Plessen, B., Peterson, L. C., Thierstein, H. R. (2007). Detailed sedimentary N isotope records from Cariaco Basin for terminations I and V: Local and global implications. *Global Biogeochemical Cycles*, 21(4), Article GB4019. <https://doi.org/10.1029/2006GB002893>
- Mertens, K. N., González, C., Delusina, I., Louwye, S. (2009). 30 000 years of productivity and salinity variations in the late Quaternary Cariaco Basin revealed by dinoflagellate cysts. *Boreas*, 38, 647-662. <https://doi.org/10.1111/j.1502-3885.2009.00095.x>
- Montoya-Sánchez, R., Devis-Morales, A., Bernal, G., Poveda, G. (2018). Seasonal and intra-seasonal variability of active and quiescent upwelling events in the Guajira system, southern Caribbean Sea. *Continental Shelf Research*, 171, 97-112. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2018.10.006>

- Noncent, D., Sifeddine, A., Emmanuel, E., Cormier, M.-H., Briceño-Zuluaga, F. J., Valdés, J., Méndez-Millán, M., Turcq, B., Bernal, J. P. (2023). A 1000-year record of paleoclimate and paleoenvironment change inferred from sedimentary organic matter in Lake Azuei, Haiti. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 632, 111845. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2023.111845>
- Ortiz-Royero, J. C., Otero, L. J., Restrepo, J. C., Ruiz, J., Cadena, M. (2013). Cold fronts in the Colombian Caribbean Sea and their relationship to extreme wave events. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 13, 2797-2804. <https://doi.org/10.5194/nhess-13-2797-2013>
- Osorio, A. F., Montoya, R. D., Ortiz, J. C., Peláez, D. (2016). Construction of synthetic ocean wave series along the Colombian Caribbean coast: A wave climate analysis. *Applied Ocean Research*, 56, 119-131. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2016.01.004>
- Páramo, J., Correa, M., Núñez, S. (2011). Evidencias de desacople físico-biológico en el sistema de surgencia en La Guajira, Caribe colombiano. *Revista de Biología Marina y Oceanografía*, 46(3), 421-430. <https://doi.org/10.4067/S0718-19572011000300011>
- Peterson, L. C. & Haug, G. H. (2006). Variability in the mean latitude of the Atlantic Intertropical Convergence Zone as recorded by riverine input of sediments to the Cariaco Basin (Venezuela). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 234(1), 97-113. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2005.10.021>
- Poggemann, D.-W., Hathorne, E. C., Nürnberg, D., Frank, M., Bruhn, I., Reißig, S., Bahr, A. (2017). Rapid deglacial injection of nutrients into the tropical Atlantic via Antarctic Intermediate Water. *Earth and Planetary Science Letters*, 463, 118-126. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2017.01.030>
- Puerres, L. Y., Bernal, G., Brenner, M., Restrepo, S., Kenney, W. F. (2018). Sedimentary records of extreme wave events in the southwestern Caribbean. *Geomorphology*, 319, 103-116. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2018.07.006>
- Richardson, P. L. (2005). Caribbean current and eddies as observed by surface drifters. *Deep-Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 52, 429-463.
- Rueda-Roa, D. T. & Müller-Karger, F. E. (2013). The southern Caribbean upwelling system: Sea surface temperature, wind forcing and chlorophyll concentration patterns. *Deep-Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 78, 102-114. <https://doi.org/10.1016/j.dsr.2013.04.008>
- Santos, F., Gómez-Gesteira, M., Varela, R., Ruiz-Ochoa, M., Días, J. M. (2016). Influence of upwelling on SST trends in the La Guajira system. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 121, 2469-2480. <https://doi.org/10.1002/2015JC011420>
- Schmidt, M. W., Vautravers, M. J., Spero, H. J. (2006). Western Caribbean Sea surface temperatures during the late Quaternary. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 7, Q02P10. <https://doi.org/10.1029/2005GC000957>
- Schmidt, M. W. & Spero, H. J. (2011). Meridional shifts in the marine ITCZ and the tropical hydrologic cycle over the last three glacial cycles. *Paleoceanography*, 26, PA1206. <https://doi.org/10.1029/2010PA001976>
- Schmitt, D., Gischler, E., Birgel, D., Peckmann, J., Anselmetti, F. S., Vogel, H. (2020). Great Blue Hole (Lighthouse Reef, Belize): A continuous, annually resolved record of Common Era sea surface temperature, Atlantic Multidecadal Oscillation and cyclone-controlled run-off. *Quaternary Science Reviews*, 247, 106570. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2020.106570>
- Schmitt, D., Gischler, E., Melles, M., Wennrich, V., Behling, H., Shumilovskikh, L., Anselmetti, F. S., Vogel, H., Peckmann, J., Birgel, D. (2025). An annually resolved 5700-year storm archive reveals drivers of Caribbean cyclone frequency. *Science Advances*, 11, eads5624. <https://doi.org/10.1126/sciadv.ads5624>
- Torres, R. R. & Tsimplis, M. N. (2013). Sea-level trends and interannual variability in the Caribbean Sea. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 118, 2934-2947. <https://doi.org/10.1002/jgrc.20229>
- Urrego, L. E., Correa-Metrio, A., González, C., Castaño, A. R., Yokoyama, Y. (2013). Contrasting responses of two Caribbean mangroves to sea-level rise in the Guajira Peninsula (Colombian Caribbean). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 370, 92-102. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2012.11.023>
- Urrego, L. E., Prado, M. A., Bernal, G., Galeano, A. (2019). Mangrove responses to droughts since the Little Ice Age in the Colombian Caribbean. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 230, 106432. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2019.106432>

- Van der Boog, C. G., Pietrzak, J. D., Dijkstra, H. A., Katsman, C. A., Campos, E. J. D.** (2019). The impact of upwelling on the intensification of anticyclonic ocean eddies in the Caribbean Sea. *Ocean Science*, 15(6), 1419-1437. <https://doi.org/10.5194/os-15-1419-2019>
- Vélez, M. I., Escobar, J., Brenner, M., Rangel, O., Betancourt, A., Jaramillo, A. J., Curtis, J. H., Moreno, J. L.** (2014). Middle to late Holocene relative sea level rise, climate variability and environmental change along the Colombian Caribbean coast. *The Holocene*, 24(8), 898-911. <https://doi.org/10.1177/0959683614534740>
- Wang, C.** (2007). Variability of the Caribbean low-level jet and its relations to climate. *Climate Dynamics*, 29, 411-422. <https://doi.org/10.1007/s00382-007-0243-z>
- Williams, C., Flower, B. P., Hastings, D. W., Guilderson, T. P., Quinn, K. A., Goddard, E. A.** (2010). Deglacial abrupt climate change in the Atlantic Warm Pool: A Gulf of Mexico perspective. *Paleoceanography*, 25, PA4221. <https://doi.org/10.1029/2010PA001928>
- Winter, A., Ishioroshi, H., Watanabe, T., Oba, T., Christy, J.** (2000). Caribbean sea surface temperatures two to three degrees cooler than present during the Little Ice Age. *Geophysical Research Letters*, 27(20), 3365-3368. <https://doi.org/10.1029/2000GL011670>
- Wurtzel, J. B., Black, D. E., Thunell, R. C., Peterson, L. C., Tappa, E. J., Rahman, S.** (2013). Mechanisms of southern Caribbean SST variability over the last two millennia. *Geophysical Research Letters*, 40, 5954-5958. <https://doi.org/10.1002/2013GL058458>
- Yu, J., Foster, G. L., Elderfield, H., Broecker, W. S., Clark, E.** (2010). An evaluation of benthic foraminiferal B/Ca and $\delta^{11}\text{B}$ for deep ocean carbonate ion and pH reconstructions. *Earth and Planetary Science Letters*, 293, 114-120. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2010.02.029>