



Artículo

Análisis de la influencia oscilación Madden-Julian (OMJ) en el comportamiento océano-atmosférico de la Cuenca Colombia durante el periodo 2010-2019

Analysis of the Influence of the Madden-Julian Oscillation (MJO) on the Ocean-Atmosphere Behavior of the Colombia Basin During the 2010–2019 Period

Aldair Enrique Romero Donado¹ Juan Diego Rodríguez Ávila² Angela Tatiana Rodríguez Tobar³ Diana P. Herrera Moyano⁴

¹ Profesional en Oceanografía Física y Ciencias Navales, Comandante ARC "Río Vichada", Armada de Colombia, San José del Guaviare, aerd2700@gmail.com, Orcid: 0009-0003-1644-0756

² Profesional en Oceanografía Física y Ciencias Navales, Jefe de Operaciones Estación de Guardacostas de Santa Marta, Armada de Colombia, Santa Marta, judioav@hotmail.com, Orcid: 0009-0004-1915-5819

³ Magister Ciencias – Meteorología, Contratista UNGRD y docente Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, atrodriguez@udistrital.edu.co, Orcid: 0009-0003-8776-5208

⁴ Especialista en Estadística Aplicada, Coordinadora Grupo de Investigación Poseidón, Escuela Naval de Cadetes "Almirante Padilla", Cartagena de Indias, poseidon@enap.edu.co, Orcid: 0000-0002-7828-9583

Resumen: Este estudio analiza la influencia de la Oscilación Madden-Julian (OMJ) en el comportamiento océano-atmosférico de la Cuenca Colombia entre 2010 y 2019. Aunque fenómenos como El Niño-Oscilación del Sur (ENOS) han sido ampliamente estudiados en Colombia, la OMJ ha recibido menos atención. Se evaluaron variables como temperatura del aire, precipitación, temperatura superficial del mar y presión atmosférica mediante análisis estacionales, intraestacionales y espectrales. Los resultados mostraron que la OMJ modula estas variables con patrones diferenciados según su fase: en la fase convectiva aumentan la temperatura y la precipitación, mientras que en la subsidiente disminuyen. Aunque no es el principal factor de variabilidad climática, la OMJ actúa como un modulador regional significativo, influyendo en la ocurrencia de otros fenómenos climáticos.



Palabras clave: Variabilidad intraestacional, Oscilación Madden-Julian, Cuenca Colombia, Análisis espectral, Interacción océano-atmósfera, Anomalías pentadales.

Citación: Romero, A.; Rodríguez, J. Rodríguez, T., Herrera, M. . Análisis de la influencia oscilación Madden-Julian (OMJ) en el comportamiento océano-atmosférico de la Cuenca Colombia durante el periodo 2010-2019. *DERROTERO* 2024, 1, 1–7. <https://doi.org/>

Recibido: 07 03 2025

Revisado: 12 08 2025

Aceptado: 15 09 2025

Publicado: 15 09 2025



Derechos de autor: © 2025 por autores.

Licenciado por Escuela Naval de Cadetes "Almirante Padilla", COL.

Este artículo es de libre acceso distribuido en las términos y condiciones de *Creative Commons Attribution* (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Abstract: This study analyzes the influence of the Madden-Julian Oscillation (MJO) on the ocean-atmosphere behavior of the Colombian Basin between 2010 and 2019. Although phenomena such as El Niño–Southern Oscillation (ENSO) have been widely studied in Colombia, the MJO has received less attention. Variables such as air temperature, precipitation, sea surface temperature, and atmospheric pressure were evaluated through seasonal, intraseasonal, and spectral analyses. The results showed that the MJO modulates these variables with distinct patterns depending on its phase: during the convective phase, temperature and precipitation increase, while during the subsiding phase, they decrease. Although it is not the main driver of climate variability, the MJO acts as a significant regional modulator, influencing the occurrence of other climate phenomena.

Keywords: Climate variability, Madden-Julian Oscillation, Colombian Basin, Spectral analysis, Ocean-atmosphere interaction, pentadal anomalies

Introducción

A lo largo del tiempo, las variables atmosféricas presentan fluctuaciones respecto a sus valores climatológicos, influenciadas por fenómenos de variabilidad climática en distintas escalas temporales: intraestacional (semanas), estacional (meses), interanual (años) e interdecadal (décadas) (Montealegre, 2009). Dentro de estas escalas, la variabilidad intraestacional desempeña un papel clave en la dinámica climática tropical, al modular la frecuencia e intensidad de eventos meteorológicos relevantes (Montealegre, 2009).

En este contexto, la señal intraestacional más destacada es la Oscilación Madden-Julian (OMJ), un patrón de interacción océano-atmósfera con una periodicidad entre 30 y 60 días, que afecta de forma significativa los procesos convectivos en regiones ecuatoriales (Zhang & Gottschaalk, 2002; Rivera & Molares, 2003). Estudios globales como los de Hendon & Salby (1994), Bantzer & Wallace (1996) y Wheeler & Hendon (2004) han evidenciado cambios en la circulación atmosférica y la precipitación en el Caribe asociados al tránsito de la OMJ. No obstante, en Colombia, la mayoría de los estudios sobre variabilidad climática se han enfocado en fenómenos de mayor escala temporal, como El Niño-Oscilación del Sur (ENOS), ampliamente reconocido por su influencia sobre la precipitación interanual (Yepes & Poveda, 2012; Cuadros, 2011).

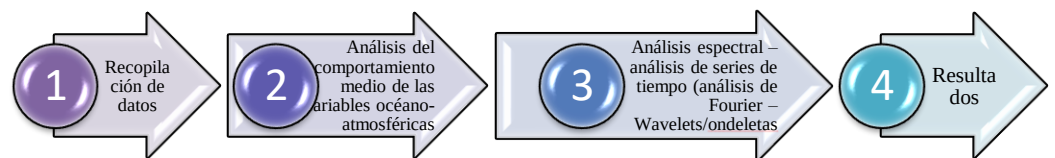
En las últimas décadas, la OMJ ha ganado relevancia en la investigación climática global debido a su influencia sobre diversos sistemas meteorológicos y su potencial para mejorar las predicciones climáticas (Krishnamurti & Shukla, 2007, citado en Torres & Pabón, 2017). Investigaciones como las de Carvalho & Jones (2004) y Martin & Schumacher (2011) han demostrado su impacto en América del Sur y Centroamérica, modulando tanto la Zona de Confluencia Intertropical Sudamericana (SACZ) como la actividad ciclónica en el Golfo de México, respectivamente. A escala del Caribe, estudios previos (Hendon & Salby, 1994; Bantzer & Wallace, 1996; Wheeler & Hendon, 2004) han identificado su relación con patrones regionales de circulación y precipitación.

En este marco, la presente investigación busca contribuir al conocimiento de la influencia de la Oscilación Madden-Julian sobre las variables océano-atmosféricas —precipitación, temperatura del aire, presión atmosférica y temperatura superficial del mar— en la Cuenca Colombia, mediante el uso de diversos métodos y técnicas de análisis de datos. El objetivo es establecer vínculos claros entre la OMJ y las condiciones meteo-marinas de esta región, aportando así a la comprensión de su impacto y al fortalecimiento de las capacidades de monitoreo y predicción climática en el país.

Metodología

El diagrama No.1 sintetiza de forma esquemática la metodología empleada en esta investigación, abarcando las etapas de recopilación de datos, análisis del comportamiento medio de las variables océano-atmosféricas, análisis espectral de series de tiempo y presentación de resultados, con el fin de ofrecer una visión general y ordenada del proceso desarrollado.

Diagrama 1.
Esquema de la metodología empleada



Recopilación de datos.

Se realizó la recopilación de registros meteorológicos y oceanográficos para las variables de interés en la investigación, tales como la presión atmosférica (Pa), precipitación (Pt), temperatura media del aire (Ta) y la temperatura superficial del mar (TSM) para el periodo entre los años 2010 y 2019, debido a que durante este intervalo se encontró la mejor disponibilidad de datos para las variables objeto de estudio. Los registros fueron extraídos de fuentes de datos de reanálisis los cuales se ilustran en la tabla 1. La serie histórica del IMJ se tomó del National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) el cual es de libre acceso. El índice se encuentra distribuido en pentadas para el periodo comprendido entre los años 2010 al 2019.

Las series históricas de variables en estudio se extrajeron para 6 puntos (coordenadas especificadas en la tabla 2. ubicaciones en la figura 1.) y se tomaron con referencia al trabajo de Rodríguez (2011), quien por medio de una correlación canónica permitió establecer las zonas homogéneas representativas del mar caribe colombiano (MCC) en la interfase mar - aire. Este procedimiento le permitió encontrar 6 puntos sobre el MCC, corroborando una coincidencia espacial que se relaciona directamente con los procesos de interacción océano - atmósfera.

Tabla 1.
Fuentes de información variables meteorológicas y oceanográficas.

Fuente	Variable	Descripción
Era - Interim	Presión atmosférica	Valores promedio diarios (hPa)
Era-Interim	Temperatura media del aire	Valores promedio diarios (°C)
ERA 5	Precipitación	Valores totales diarios (mm)
GHR SST	Temperatura Superficial del Mar	Valores totales diarios (TSM)
NCEP/NCAR NOAA	Índice Madden-Julian IMJ (Velocidad potencial vertical 200 hPa)	Valores pentadales

Tabla 2.

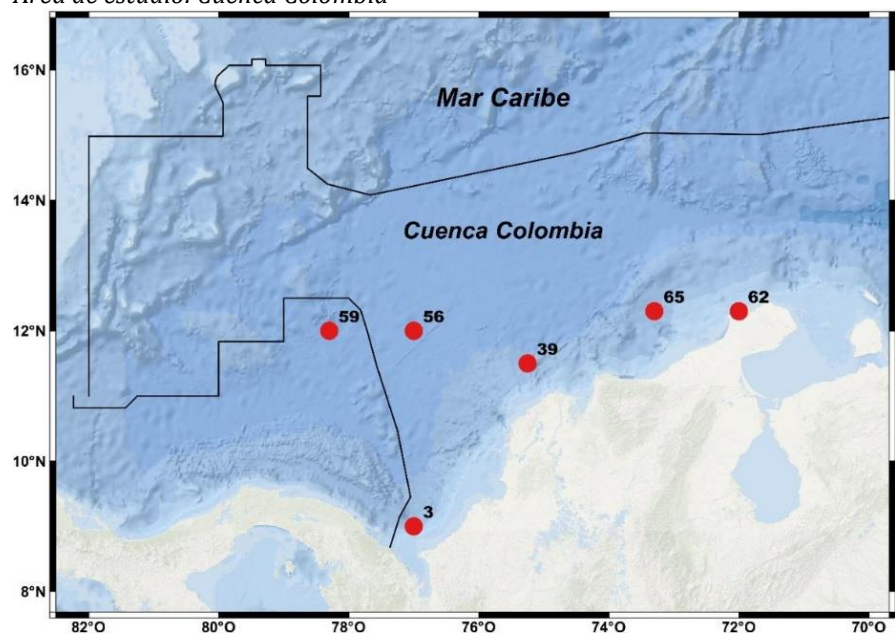
Coordenadas puntos de extracción información meteorológica y oceanográfica.
Nota. Adaptado de Rodríguez (2011).

No. Punto	Latitud °N	Longitud °W
3	9	-77
39	11.5	-75.25
56	12	-77
59	12	-78.3
62	12.3	-72
65	12.3	-73.3

Nota. Adaptado de Rodríguez (2011).

Figura 1.

Área de estudio: Cuenca Colombia



Nota. Adaptado de Rodríguez (2011).

Análisis del comportamiento medio de las variables océano-atmosféricas

A las series de tiempo meteorológicas se les efectuó un análisis exploratorio de la información, donde se identificó la distribución de cada variable para cada punto de interés, los estadísticos básicos para cada serie de tiempo tal como el cálculo del promedio aritmético, identificación de máximos y mínimos, desviación típica, rango, entre otros y fue representado mediante histogramas. Así mismo se revisaron las series de tiempo para identificar valores extremos o valores erróneos.

Luego del tratamiento exploratorio de datos, se realizó un análisis más detallado sobre el comportamiento típico de la Pt, Pa, Ta, y TSM en una escala pentadal (valor total o promedio de las variables analizadas correspondientes a un periodo de cinco días consecutivos) a lo largo del año en relación a los procesos de escala global, sinóptica y de mesoescala principales dominantes en la región del mar Caribe. con el fin de analizar posteriormente como modula dicha oscilación los patrones de comportamiento de las variables analizadas. Posteriormente, se utilizó el diagrama tipo Hovmöller para representar la distribución, comportamiento y evolución de cada variable a escala pentadal a través el año, gráficos que permitieron facilitar la descripción de las características climáticas de la región.

Análisis Espectral – análisis de series de tiempo

El análisis de series de tiempo se refiere al grupo de estadísticas donde las observaciones son recogidas en forma secuencial y se busca, al menos parcialmente, entender o explotar la dependencia entre esas observaciones, este análisis se llevó a cabo a través de un análisis espectral en base al método de transformadas de Fourier (González, 2001).

Análisis de Fourier

Con los resultados de las anomalías diarias se realizó un análisis espectral a través de un análisis de Fourier para cada variable de interés. El análisis espectral es una herramienta matemática muy útil en la cual ejecuta una depuración de los datos debido a que las series presentan comportamientos cíclicos y periodicidad (Storch & Zwiers, 1999, como se citó en Rodríguez, 2011). El análisis de Fourier permitió identificar los ciclos de mayor densidad espectral e igualmente identificar si dentro de la serie se encontraba la señal de la OMJ, por lo que el análisis de Fourier fue aplicado a cada serie de datos diaria de cada variable.

Wavelets – Ondeletas.

El análisis de ondeletas se efectuó entre las anomalías pentadales de cada variable de interés y el IMJ para explorar la influencia entre estas. Esta transformada permite seleccionar los datos en pequeños componentes en una escala de tiempo seleccionada, permitiendo conocer los picos altos y bajos de poder espectral que se obtuvo en un determinado periodo de tiempo, permitiendo el análisis de cada frecuencia por separado (Beltrán & Colmenares, 2011).

Para el desarrollo del análisis se utilizaron wavelets coherence (WTC), las cuales encuentran regiones en el espacio de frecuencia de tiempo donde las dos series de tiempo covarían (pero no necesariamente tienen alta potencia). Este se basa en el coeficiente de correlación de Pearson utilizado en estadística, pero en el dominio de la frecuencia y el tiempo y puede medir la longitud media del vector resultante (o consistencia) de la densidad espectral cruzada entre dos señales. Su valor al cuadrado varía de 0 a 1, lo que significa correlación frecuencial lineal baja y alta (Zhao, Y. et al., 2018).

Para el análisis de ondeleta fueron calculadas las anomalías pentadales y contrastadas además directamente con los valores del índice de velocidad potencial vertical de la OMJ en 200 hPa.

Resultados

Comportamiento típico estacional de las variables objeto de estudio

Histogramas

Con el fin de mostrar de manera gráfica la distribución de las variables, se realizaron histogramas y diagramas de caja por cada punto del área de estudio. Estos fueron útiles para ilustrar de manera descriptiva la distribución de los datos, mostrando su promedio, desviación estándar, valores máximos – mínimos y el rango.

El análisis de los datos de las variables océano-atmosféricas en cada punto representa el comportamiento característico de cada subregión de la Cuenca Colombia, en términos de áreas con diferentes masas de aire y de agua (Rodríguez, 2011). Esta aproximación permite identificar patrones locales relevantes para la comprensión del sistema climático regional.

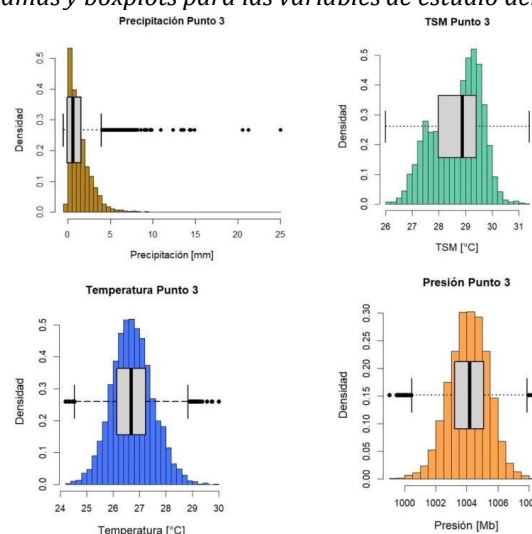
En primer lugar, se observó que la temperatura del aire (T_a) en todos los puntos analizados osciló entre los 23,1 °C y los 30 °C. Cabe destacar que, en todos los casos, esta variable se ajustó a una distribución Gaussiana, lo que indica un comportamiento relativamente estable y predecible en términos estadísticos.

Por otro lado, la presión atmosférica (P_a) presentó en su mayoría valores superiores a los 1000 hPa. No obstante, en el punto 3 se identificó un valor cercano a los 999 hPa. Este comportamiento puede estar influenciado por diversos factores, como la migración de la Zona de Confluencia Intertropical (ZCIT) (Ricaurte & Bastidas, 2017), la presencia de ondas del este (Andrade, 2015) o la actividad intermitente de la baja presión del Darién.

En cuanto a la temperatura superficial del mar (TSM), los puntos 3 y 65 se destacaron por representar los valores máximos y mínimos, respectivamente. Estos registros coinciden con áreas geográficas clave: el giro Panamá-Colombia, también conocido como la piscina cálida del sector suroccidental, y la surgencia costera en la Guajira, identificada como la piscina fría del sector nororiental (Bernal et al., como se citó en Ricaurte & Bastidas, 2017).

Finalmente, respecto a la precipitación, se registraron valores que variaron entre 0 mm y 25 mm. Los puntos 56 y 59 presentaron los niveles más bajos, mientras que los puntos 3 y 62 evidenciaron lluvias de mayor intensidad. Estos últimos corresponden a los extremos geográficos del área de estudio: el Golfo de Urabá y la Península de La Guajira, respectivamente.

Figura 2.
Ejemplo resultado histogramas y boxplots para las variables de estudio del punto 3



Diagramas Hovmöller

Para determinar el comportamiento de las variables objeto de estudio se elaboraron diagramas tipo Hovmöller. De esta manera fue posible representar la distribución, comportamiento, evolución de cada variable a escala pentadal a través el año, y facilitar la descripción de las características climáticas de la región.

Comportamiento medio de la temperatura media del aire en puntos representativos de la Cuenca Colombia

De acuerdo con la figura 2, la temperatura del aire (T_a) presenta un claro patrón de variación latitudinal. En general, las estaciones ubicadas más al norte registran temperaturas más frescas, mientras que las del sur presentan valores más elevados. Este comportamiento sugiere una influencia directa de la posición geográfica sobre los gradientes térmicos en la Cuenca Colombia.

Asimismo, a lo largo del año se mantiene dicho gradiente térmico. Específicamente, durante los meses de finales e inicios de año se observan los valores más bajos de T_a , que oscilan entre los 25 °C y 26 °C. Este enfriamiento es especialmente notorio en la estación 65, ubicada en el extremo norte. Cabe resaltar que este período coincide con la temporada de máximos vientos alisios en la región, lo que contribuye significativamente al descenso de la temperatura del aire.

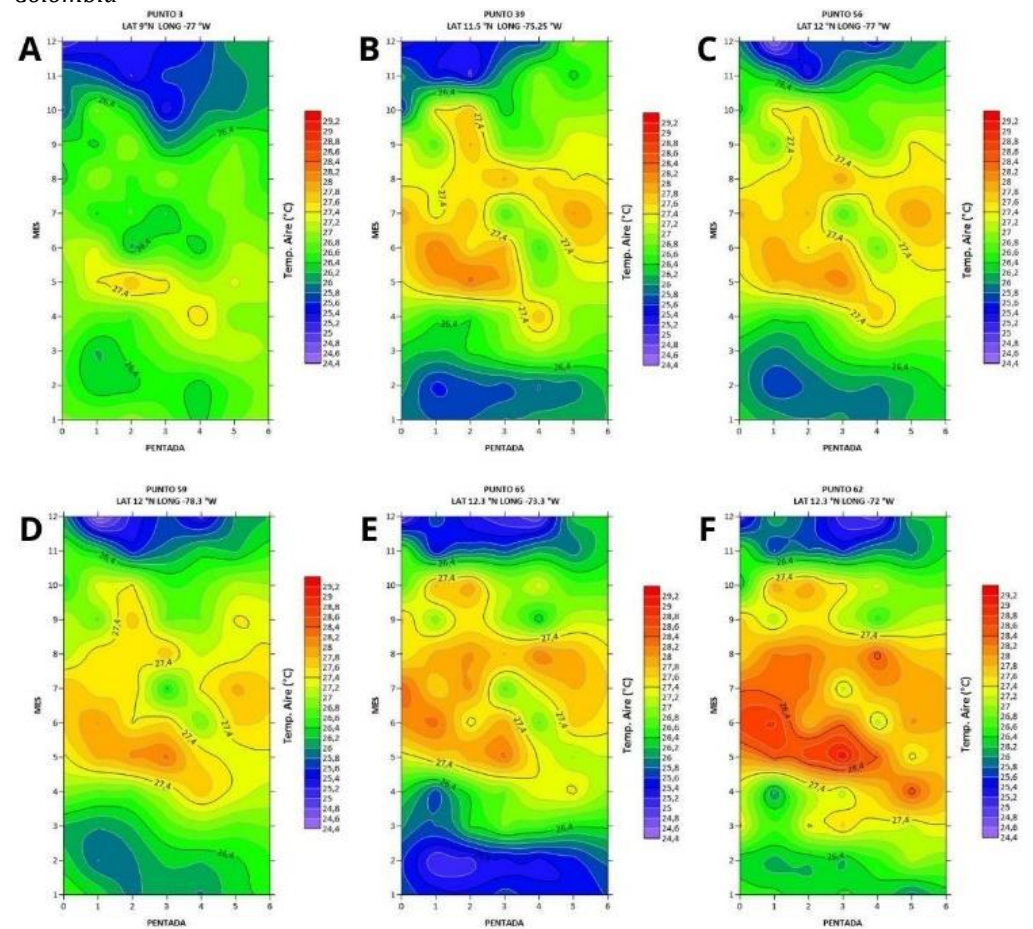
Como es ampliamente reconocido, los vientos alisios alcanzan su mayor intensidad durante el invierno del hemisferio norte, siendo más fuertes en el sector norte de la cuenca en comparación con el sur (Andrade, 2015). Esta intensificación de los vientos genera un efecto de enfriamiento adicional, especialmente en las zonas expuestas a la influencia directa de estas corrientes.

Por otro lado, los meses de abril y mayo se configuran como un período de transición. Durante esta etapa, los vientos alisios tienden a debilitarse, lo que permite un paulatino incremento de la temperatura del aire. Este calentamiento se manifiesta progresivamente hacia el norte de la región, marcando el inicio de una fase más cálida en el ciclo anual.

Finalmente, los valores más altos de T_a se registran entre los meses de junio y septiembre, con rangos que oscilan entre los 27 °C y 29 °C. Este período se caracteriza por una disminución significativa en la intensidad de los vientos y por una mayor frecuencia de procesos convectivos, lo que favorece el incremento térmico en toda la región.

Figura 3.

Distribución de la Ta a escala pentadal - mensual en los puntos representativos de la Cuenca Colombia

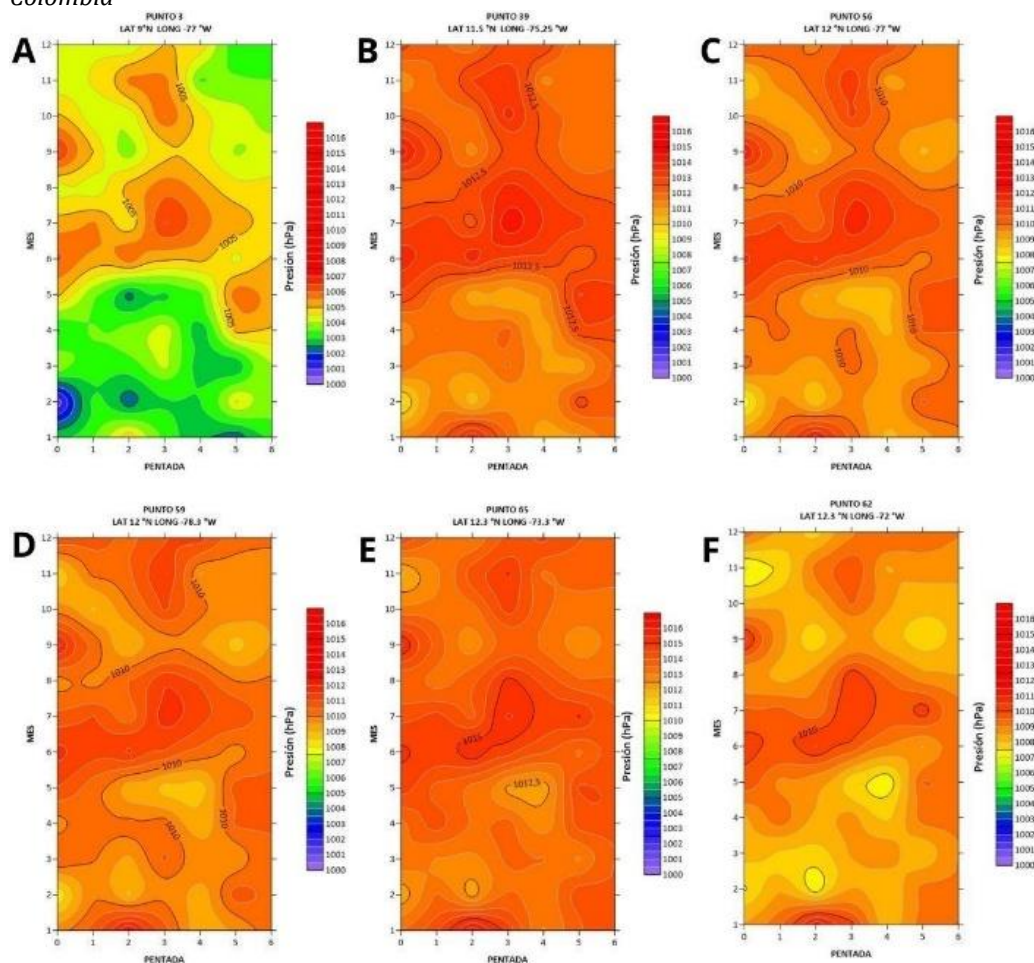


Comportamiento medio de la presión atmosférica en los puntos representativos de la Cuenca Colombia

De acuerdo con la figura 3, la Pa en el Caribe Colombiano presenta una alta dinámica en su comportamiento en la zona sur 3 esto debido a su ubicación geográfica (Golfo de Urabá) ya que esta se ve influenciada por la migración de la ZCIT siendo el único punto que tiene los valores más bajos de presión entre la pentada cero y uno de los meses de enero y febrero; seguido esto en los puntos que están ubicados en la zona centro-norte (39, 56 y 59) mantiene su dinámica similar con una Pa que oscila entre los 1010,0 hPa y 1016,0 hPa en el mismo periodo de tiempo y pentadas, finalmente se identificó que en los puntos del extremo norte (65 y 62) se observa la más alta presión entre la segunda, tercera y cuarta pentada los meses de junio, julio y agosto.

Figura 4.

Distribución de la Pa a escala pentadal - mensual en los puntos representativos de la Cuenca Colombia



Comportamiento medio de la precipitación total en los puntos representativos de la Cuenca Colombia

De acuerdo con la figura 4, la distribución pentadal de la precipitación total en la Cuenca Colombia evidencia una marcada variabilidad estacional. En primer lugar, los menores valores de precipitación se presentan durante la época seca, la cual se extiende entre los meses de diciembre y abril. Esta etapa se caracteriza por una reducción significativa en las lluvias, lo que concuerda con el comportamiento climático habitual de la región en ese periodo.

Posteriormente, entre los meses de mayo y agosto, se identifica un periodo de transición con precipitaciones más variadas. En esta fase, la cantidad de lluvia comienza a incrementarse de manera progresiva, sin alcanzar todavía los máximos anuales. Este comportamiento refleja el cambio en la dinámica atmosférica hacia condiciones más húmedas.

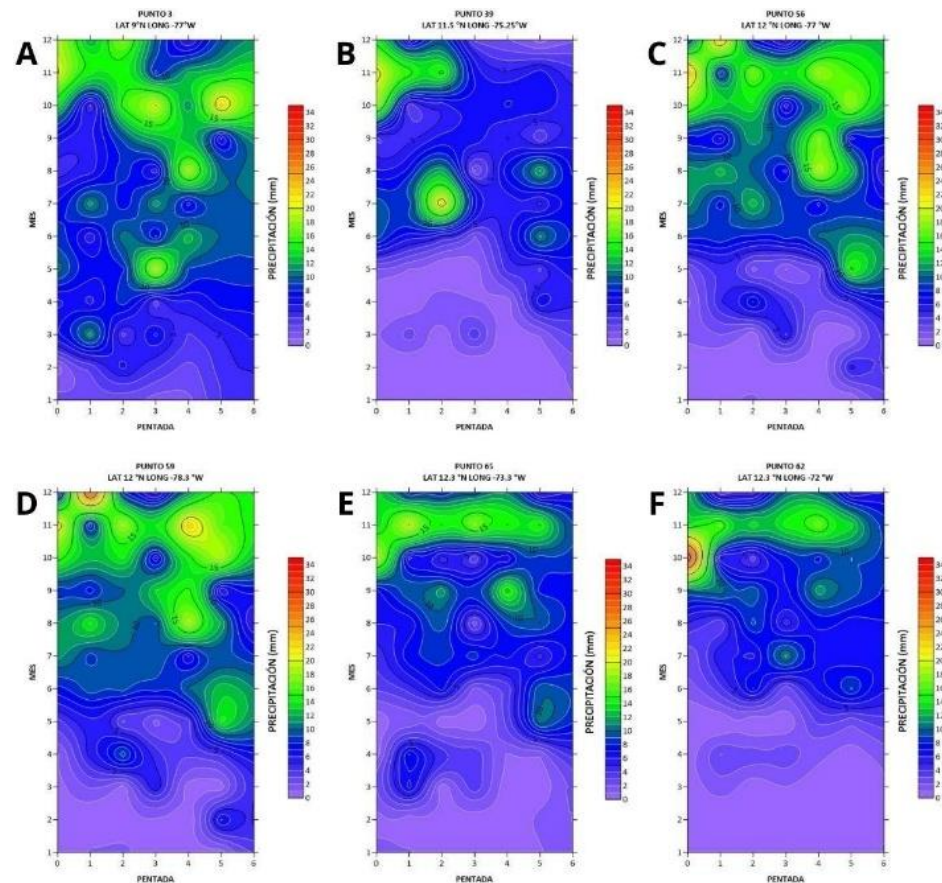
Es así que, los mayores valores de precipitación se registran entre septiembre y noviembre, periodo que corresponde a la época de lluvias. Esta temporada se caracteriza por la presencia de vientos débiles y de orientación variable, así como por la manifestación de ciclones tropicales (huracanes), los cuales tienden a incrementar notablemente el régimen de lluvias en toda la Cuenca Colombia.

En síntesis, los registros de precipitación y su distribución pentadal se ajustan claramente a las tres épocas climáticas mencionadas: seca, de transición y lluviosa. Esta configuración responde a la dinámica climática propia de la zona, influenciada por diversos factores como el posicionamiento del sistema de baja presión del Darién durante el segundo semestre del año, el paso de ondas tropicales del este y la incidencia, directa o indirecta, de ciclones tropicales en el Caribe y el Atlántico occidental.

No obstante, es importante señalar que, en el área sur e insular de la Cuenca, la época de transición no se manifiesta con la misma claridad. Esta diferencia puede deberse a factores locales que modulan la respuesta del régimen de lluvias a las condiciones atmosféricas regionales.

Figura 5.

Distribución de la Pt a escala pentadal - mensual en los puntos representativos de la Cuenca Colombia

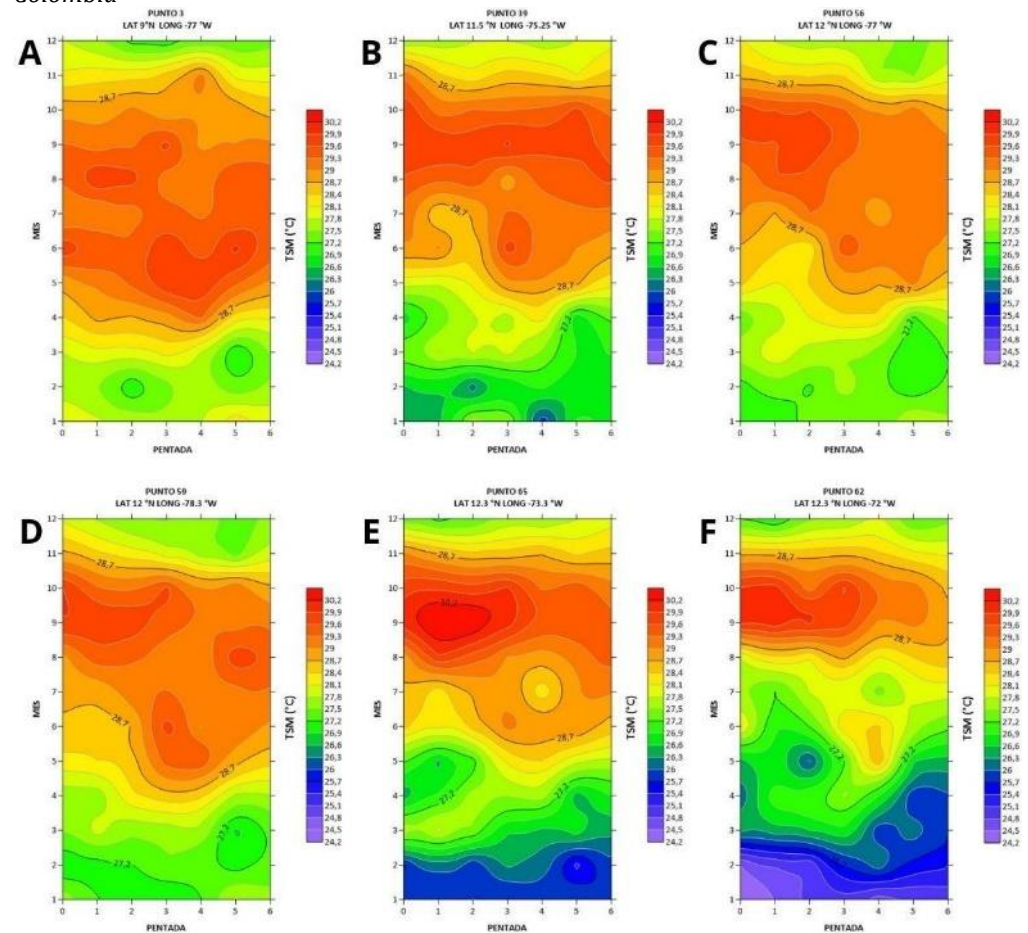


Comportamiento medio de la temperatura superficial del mar en los puntos representativos de la Cuenca Colombia

De acuerdo con la figura 5, la TSM presenta una marcada variabilidad estacional en la región, evidenciándose menores valores durante los primeros meses del año (enero a marzo), con temperaturas que oscilan entre [24,2 °C a 27,8 °C], siendo más frescas en las estaciones ubicadas al norte (puntos 65 y 62). A partir de marzo y hasta mayo se observa un incremento paulatino en la TSM, con registros entre [26,3 °C a 28,6 °C], reflejando una fase de transición térmica. Finalmente, los mayores valores de TSM se identificaron entre los meses de septiembre y octubre, con temperaturas que alcanzan entre [29,0 °C a 30,2 °C], en concordancia con el debilitamiento de los vientos alisios, lo que favorece un mayor calentamiento superficial del mar en toda la cuenca Caribe colombiana.

Figura 6.

Distribución de la TSM a escala pentadal - mensual en los puntos representativos de la Cuenca Colombia



Análisis espectral

Análisis de Fourier

Este análisis se utilizó con el fin de examinar la composición de las series de tiempo de los puntos escogidos para el estudio y así determinar los ciclos predominantes de las variables a través de la elaboración y lectura de periodo gramas de cada variable objeto de estudio (ver anexo A). El análisis se realizó con las series de datos de anomalías pentadales de las variables de interés (Pt, Pa, Ta y TSM) y los ciclos fueron determinados con la fórmula

$$P = \frac{1}{f}$$

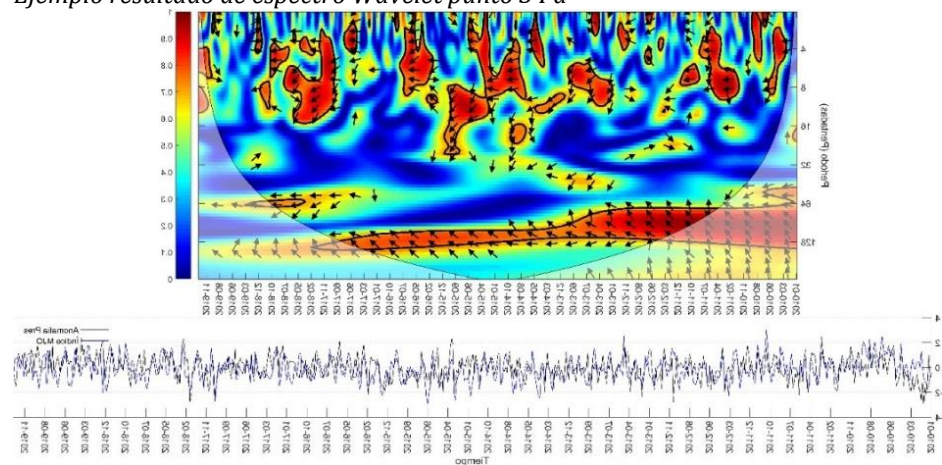
Luego se tabularon los respectivos resultados (densidad espectral, frecuencia, período en pentadas y periodo en días) ordenando los valores de mayor a menor poder espectral. A pesar de que en las tablas de frecuencia se hallaron ciclos relacionados con la OMJ dentro del 60% de la varianza con ciclos de 41 y 50 días para la precipitación; 30 y 56 días para presión; 52 y 60 días para la temperatura y 36 y 60 días para la TSM, sin embargo, estos fueron de muy poca densidad espectral.

Análisis de Wavelets por variable

En la siguiente sección se presenta el análisis de los resultados para el espectro wavelet por variable, la figura 6 muestra un ejemplo como resultado de espectro. Al determinar los resultados, se obtuvo que bajo las fases subsidentes de la OMJ los valores de Ta, Pt y TSM disminuyen demostrando que son inversamente proporcionales y los de Pa aumentan; por otra parte, bajo fases convectivas de la OMJ se identificó que los valores de Ta, Pt y TSM aumentan y los de Pa disminuyen indicando que el índice de la OMJ y la Pa son directamente proporcionales. Esto teniendo en cuenta que para la temperatura el efecto tiende a ser menor debido al flujo de los vientos los cuales afectan la superficie del mar y además tienen la influencia de oscilaciones de largo periodo.

Figura 7.

Ejemplo resultado de espectro Wavelet punto 3 Pa



Temperatura

Como resultado del análisis del espectro wavelet para la variable de temperatura del aire (Ta), se observó un comportamiento similar en todos los puntos, identificando periodos de anomalías que oscilan entre 7 y 8 pentadas (35 a 40 días). Estos ciclos podrían estar relacionados con la influencia de la Oscilación Madden-Julian (OMJ).

Por otra parte, los períodos en los que se detectaron núcleos con mayor potencia en el espectro corresponden a los años 2012–2013, 2014–2015 y 2017–2018, momentos que podrían asociarse directamente con los ciclos de la OMJ. En particular, durante los últimos meses de 2012, en todos los puntos de análisis, salvo en los puntos 3 y 65, se identificaron ciclos de entre 8 y 12 pentadas (40 a 60 días).

En el año 2014, los puntos 59, 62 y 65 presentaron ciclos más cortos, entre 5 y 7 pentadas (25 a 35 días), durante los cuales se observaron anomalías positivas en la temperatura del aire. Estas anomalías coincidieron con valores positivos en la presión atmosférica (Pa) para el mismo periodo, sugiriendo una posible relación entre ambas variables.

Durante 2015, todos los puntos, excepto aquellos ubicados al norte del área de estudio (62 y 65), mostraron ciclos entre 8 y 12 pentadas (40 a 60 días). En contraste, en 2016, la mayoría de los puntos exhibieron ciclos más cortos, entre 5 y 8 pentadas (25 a 40 días), con la excepción del punto 3, que no presentó este patrón.

En noviembre de 2017, se observó en todos los puntos un comportamiento con ciclos de entre 5 y 10 pentadas (25 a 50 días), lo que indica un patrón generalizado de variabilidad intraestacional en ese periodo.

Además de estos ciclos de corto periodo, probablemente vinculados con la señal de la OMJ, se identificó una señal de mayor potencia entre 2011 y 2012, que podría estar relacionada con una variabilidad climática de mayor escala temporal, manifestada en ciclos superiores a 60 pentadas (>300 días).

Presión atmosférica

Como resultado del análisis de espectro wavelet para la variable presión atmosférica (Pa), se hallaron ciclos de entre 4 y 8 pentadas (20 y 40 días) durante los períodos 2010–2013 y 2015–2016. Sin embargo, durante abril de 2015, solo en los puntos 62 y 65 se identificaron ciclos más amplios, entre 4 y 12 pentadas (20 y 60 días).

Además, se observó que durante ese mismo mes, las anomalías positivas de Pa coincidieron con anomalías igualmente positivas en la temperatura del aire (Ta), mientras que las variables precipitación (Pr) y temperatura superficial del mar (TSM) mostraron un comportamiento inversamente proporcional, evidenciando relaciones diferenciales entre estas variables.

En el año 2014, en los puntos 56, 59, 62 y 65 se identificaron ciclos de entre 7 y 10 pentadas (35 y 50 días). Por su parte, en 2017 se observó un comportamiento similar en todos los puntos durante noviembre, con ciclos estacionales que oscilaron entre 4 y 12 pentadas (20 y 60 días). En general, el mayor espectro de estos ciclos se detectó durante 2014 y 2015, salvo en los puntos 62 y 65, mientras que el mayor poder espectral de estas oscilaciones se registró en 2011.

Así mismo, al igual que en el caso de la temperatura del aire (Ta), se identificaron ciclos de mayor periodo y potencia dentro de la serie de datos de Pa. Se detectó un ciclo de 128 pentadas (620 días, aproximadamente 1.7 años) con un debilitamiento significativo a partir de 2013 en los puntos 59, 62 y 65. También se observó una señal con periodicidad entre 64 y 128 pentadas durante el periodo 2011-2017.

Por lo tanto, estos hallazgos permiten inferir que la Oscilación Madden-Julian (OMJ) no es la señal predominante en la varianza de la presión atmosférica en los puntos analizados, evidenciando la influencia de otros factores o ciclos de mayor escala temporal.

Precipitación

Como resultado del espectro wavelet para la variable de precipitación, se identificaron señales asociadas con el ciclo intraestacional de entre 4, 8 y 12 pentadas (20, 40 y 60 días). Para el año 2010, a excepción del punto 3, el comportamiento de los ciclos estacionales se reflejó durante los diferentes meses del año. Sin embargo, en los puntos se identificaron ciclos comunes de entre 4 y 7 pentadas (20 y 35 días).

En los años 2013 y 2015 se observaron ciclos de entre 4 y 8 pentadas (20 y 40 días). Durante 2015, las anomalías de precipitación (Pr) observadas fueron negativas; sin embargo, el punto 62 mostró anomalías positivas, presentando una relación con la presión atmosférica (Pa), dado que para ese mismo período se registraron anomalías negativas de Pa.

Además, en el punto 65 también se identificó una relación inversa: se observaron anomalías negativas de Pr y anomalías positivas de Pa. Asimismo, se detectaron señales de bajo espectro asociadas con el ciclo intraestacional, que oscilaban entre 4 y 12 pentadas (20 y 60 días). En el punto 62, por su parte, se evidenció un debilitamiento de estas señales durante el período comprendido entre 2014 y 2017.

Cabe resaltar que todos los puntos mostraron una señal de mayor potencia en el espectro, que oscila entre 64 y 128 pentadas (320 y 640 días), posiblemente relacionada con una señal de variabilidad climática de mayor periodo, dada la duración de los ciclos identificados.

Temperatura Superficial del Mar

En los puntos 3, 59, 62 y 65 se obtuvieron ciclos de 4 y 8 pentadas (20 y 40 días). Se resalta que, en el punto 3, las anomalías fueron positivas y coincidieron con anomalías negativas de presión atmosférica (Pa) durante el mismo periodo de tiempo.

Durante el año 2012, los puntos 39, 56 y 65 mostraron ciclos entre 4 y 10 pentadas (20 y 50 días). Por otro lado, en 2014, los valores espectrales asociados con la varianza de la temperatura superficial del mar (TSM) presentaron diferentes ciclos: en los puntos 3 y 56 se observaron ciclos de 7 pentadas, mientras que en el resto los ciclos correspondieron a 4, 5 y 10 pentadas (20, 25 y 50 días).

Durante el período 2016-2017, en los puntos 3 y 56 se identificó una señal de entre 4 y 12 pentadas (20 y 60 días), posiblemente relacionada con la Oscilación Madden-Julian (OMJ).

Se observó que, en la mayoría de los puntos —a excepción del punto 62—, la TSM mostró un comportamiento con ciclos asociados a la OMJ durante todo el periodo de estudio. Sin embargo, se identificó un debilitamiento de esta señal durante 2011 y 2013, excepto en el punto 39, que mostró señales débiles asociadas al ciclo de la OMJ durante 2016 y 2017.

También se identificaron señales de mayor potencia con ciclos en promedio de 32 y 64 pentadas (160 y 320 días), posiblemente relacionadas con una señal de variabilidad climática de mayor período.

Discusión

En este estudio se caracterizó la variabilidad estacional y espectral de cuatro variables océano-atmosféricas (Pt, Ta, Pa y TSM) en seis puntos representativos de la Cuenca Colombia. En primer lugar, los resultados exploratorios mostraron que tanto la precipitación como la temperatura del aire presentan una marcada temporada seca al inicio y final del año, coincidente con el fortalecimiento de los vientos alisios, y un período de transición gradual de abril a mayo, antes de la intensificación de las lluvias y el leve enfriamiento de la Ta entre junio y septiembre. Este patrón concordó con hallazgos previos en zonas tropicales sometidas a la influencia de la ZCIT y los alisios (Andrade, 2015).

La presión atmosférica fue notablemente más baja en el punto 3 (Golfo de Urabá), reflejo de la migración de la ZCIT y de la influencia intermitente del sistema de baja presión del Darién, mientras que los demás puntos exhibieron oscilaciones anuales de Pa asociadas al ajuste estacional de los alisios (Ricaurte & Bastidas, 2017). Estos comportamientos coinciden con los patrones descritos por Rodríguez (2012), quienes también reportaron variaciones ligadas a ondas del este y a la posición de la ZCIT.

Con respecto a la temperatura superficial del mar, las áreas de mayor TSM punto 3 (piscina cálida Panamá-Colombia) y punto 65 (surgencia de La Guajira) coincidieron con las zonas de mayor pluviosidad, lo que sugiere una fuerte correlación entre los elevados resultados de TSM y aumento de la actividad convectiva, tal como han sugerido Bernal et al. (citado en Ricaurte & Bastidas, 2017). Además, la baja variación latitudinal de la TSM refuerza la elevada inercia térmica del océano frente a cambios meteorológicos de corto plazo.

En el análisis espectral, el estudio de Fourier reveló ciclos intraestacionales (30 y 60 días) para todas las variables, aunque con baja densidad espectral, así como ciclos interanuales (300 y 640 días) con mayor potencia. Esto indica que oscilaciones como ENSO y la Oscilación Quasi-Bienal (OQB) pueden modular la variabilidad climática local. Estos resultados concuerdan parcialmente con investigaciones previas que destacan el papel del ENSO en la región Caribe (Andrade, 2015).

Por otro lado, el espectro wavelet mostró que la señal de la OMJ (30-60 días) está presente en la temperatura del aire (Ta), presión atmosférica (Pa) y temperatura superficial del mar (TSM), pero con potencia limitada y sin un dominio claro en la varianza total. Sin embargo, se identificaron núcleos significativos en 2014 y 2015 para Ta, Pa y TSM, y en 2010 y 2011 para la precipitación (Pt).

No obstante, estudios recientes amplían la comprensión sobre cómo la OMJ modula la precipitación en América del Sur, lo que permite contrastar nuestros resultados. Recalde-Coronel et al. (2020) encontraron que, a pesar de la disipación del núcleo convectivo de la OMJ al cruzar el Pacífico oriental, este reaparece al ingresar en el occidente de Sudamérica, modulando la lluvia en un 20–50% respecto a la climatología.

En consecuencia, nuestros hallazgos en la cuenca Colombia, donde la señal intraestacional de la OMJ es detectada pero con potencia limitada, sugieren que la región Caribe presenta una respuesta menos intensa en comparación con el Pacífico oriental tropical.

De manera complementaria, Minjares et al. (2025) muestran que los eventos extremos de OMJ tienen impactos mucho más intensos sobre Sudamérica, generando anomalías de precipitación de gran extensión espacial, moduladas además por las fases del ENSO. Este hallazgo aporta una posible explicación a la variabilidad de nuestros resultados: mientras que la señal detectada en la Cuenca Colombia aparece débil o intermitente en los análisis espectrales, es posible que su intensidad dependa de si se trata de eventos extremos o débiles, así como de su interacción con ENSO, lo que coincide con la atenuación de la señal en años como 2011 y 2013 observada en nuestro análisis wavelet.

Alvarez et al. (2015) documentaron que el impacto de la OMJ sobre Sudamérica tiene una fuerte dependencia estacional, con lluvias intensificadas en la región del SACZ durante fases 8-1 y en el sureste de Sudamérica durante fases 3-4, acompañadas de anomalías de temperatura y circulación. En nuestros resultados se indica la presencia de núcleos intraestacionales en Pt y Ta, lo cual concuerda con la estacionalidad señalada por dichos autores. No obstante, el hecho de que en la cuenca Colombia la señal aparezca más irregular sugiere que la respuesta de esta región está modulada tanto por oscilaciones de gran escala como por forzamientos locales (vientos alisios, surgencias y baja del Darién), lo que abre un espacio de discusión sobre la coexistencia de señales globales y regionales en el Caribe occidental.

En conjunto, estos estudios sugieren que la OMJ sí ejerce una influencia sobre el clima de la Cuenca Colombia, pero con una expresión más débil e intermitente respecto a otras zonas de Sudamérica, lo cual refuerza la necesidad de análisis regionales que profundicen el rol de la OMJ y su interacción con forzamientos locales.

Conclusiones

Este estudio demuestra que la dinámica atmosférica y oceánica de la Cuenca Colombia está regida por la interacción estacional de los alisios y la migración de la Zona de Convergencia Intertropical, con una presión excepcionalmente baja en el Golfo de Urabá atribuible al sistema de baja del Darién, y una estrecha relación entre las “piscinas” térmicas del océano y los extremos de precipitación. El análisis espectral confirma que, aunque la Oscilación de Madden-Julian OMJ aporta señal de variabilidad intraestacional, los ciclos interanuales (vinculados a ENSO y OQB) son los principales moduladores de la variabilidad climática regional.

La relación identificada de la OMJ para las variables de Ta, Pa, Pt y TSM están moduladas debido a la influencia de la OMJ, aunque esta no es un componente decisivo de dicha relación, si puede ser un componente el cual regule y genere un ambiente propicio para otras oscilaciones de largo periodo que generen cambios en la variabilidad climática de la Cuenca Colombia.

Como recomendación se sugiere que se realicen estudios con diferentes análisis los cuales permitan determinar la presencia de esta señal en el territorio, ya que, a pesar de las claras evidencias de la presencia de esta señal, no existen muchas investigaciones al respecto.

Referencias

- Alvarez et al. (2015). Influence of the Madden-Julian Oscillation on precipitation and surface air temperature in South America. Enlace: <https://ri.conicet.gov.ar/handle/11336/41892>
- Andrade, C. (2015). *Oceanografía dinámica de la cuenca de Colombia*. Alpha Editores.
- Andrade, C., & Trasviña, A. (2002). El mar Caribe colombiano. En *Circulación oceánica y climatología tropical en México y Colombia*.
- Bantzer, C., & Wallace, J. (1996). Intraseasonal variability in the tropical mean temperature and precipitation and their relation to the tropical 40–50 day oscillation. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 53 (21).
- Beltrán, O., & Colmenares, C. (2011). Aplicación de ondeletas en datos de posicionamiento continuo para la región colombiana con fines geodinámicos. *UD y la Geomática*, (5), 92–102. <https://doi.org/10.14483/23448407.3649>
- Carvalho, L. M., Jones, C., & Liebmann, B. (2004). The South Atlantic convergence zone: Intensity, form, persistence, and relationships with intraseasonal to interannual activity and extreme rainfall. *Journal of Climate*, 17, 88–108.
- Cuadros Rubio, N. (2011). *Análisis de la variabilidad de la temperatura del aire en regiones de Colombia bajo la influencia de la oscilación Madden-Julian durante los años 1978–2008* [Tesis de Maestría, Universidad Nacional de Colombia]. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/8422>
- González, D. (2001). Análisis espectral: consideraciones teóricas y aplicabilidad. *Economía y Sociedad*, (16), 45–60.
- Hendon, H., & Salby, M. (1994). The life cycle of the Madden-Julian Oscillation. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 51 (15), 2225–2237. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1994\)051<2225:TLCOTM>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1994)051<2225:TLCOTM>2.0.CO;2)
- Krishnamurti, V., & Shukla, J. (2007). Intraseasonal and seasonally persisting patterns of Indian Monsoon rainfall. *Journal of Climate*, 20 (1), 3–20.
- Madden, R., & Julian, P. (1971). Detection of 40–50 day oscillation in the zonal wind in the tropical Pacific. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 28 (7), 702–708.
- Martin, E. R., & Schumacher, C. (2010). Modulation of Caribbean precipitation by the Madden-Julian Oscillation. *Journal of Climate*, 24 (3), 813–824. <https://doi.org/10.1175/2010jcli3773.1>
- Minjares et al. (2025). Evolution of Extreme Madden-Julian Oscillation Events and their Impacts on South America. Enlace: <https://arxiv.org/pdf/2507.202893>
- Montealegre, J. (2009). Estudio de la variabilidad climática de la precipitación en Colombia asociada a procesos oceánicos y atmosféricos de meso y gran escala. *IDEAM Informe* n°22. <http://www.ideam.gov.co/documents/21021/21789/Estudio+de+la+variabilidad+cli+m%C3%A1tica+de+la.pdf/643c4c0e-83d7-414f-b2b4-6953f64078d3>
- Recalde-Coronel et al. (2020). Madden-Julian oscillation influence on sub-seasonal rainfall variability on the west of South America. Enlace: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00382-019-05107-2>
- Ricaurte, C., & Bastidas, M. (2017). Regionalización dinámica del Caribe. En *Regionalización oceanográfica: una visión dinámica del Caribe* (pp. 19). Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras José Benito Vives De Andréis (INVEMAR).
- Rivera, S., & Molares, R. (2003). Evidencias de la oscilación del tipo Madden y Julian en el Caribe colombiano. *Boletín Científico CIOH*, 21, 101–113. https://doi.org/10.26640/01200542.21.101_113
- Rodríguez Castro, L. (2011). *Identificación de zonas homogéneas en la interfase mar–aire del Mar Caribe colombiano y relación entre la variabilidad de parámetros oceanicos y atmosféricos de algunos puntos representativos de estas zonas y la oscilación atlántico norte* [Tesis de Maestría, Universidad Nacional de Colombia]. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/8559>
- Torres Pineda, C. E. (2012). *Efecto de las ondas Madden-Julian en la precipitación sobre algunas regiones del territorio colombiano* [Tesis de Maestría, Universidad Nacional de Colombia]. <https://core.ac.uk/download/pdf/11058098.pdf>
- Torres, C., & Pabón, J. (2017). Variabilidad intraestacional de la precipitación en Colombia y su relación con la oscilación de Madden-Julian. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 41 (158), 79–93. <https://doi.org/10.18257/raccefyn.380>

Wheeler, M., & Hendon, H. (2004). An all-season real-time multivariate MJO index: Development of an index for monitoring and prediction. *Monthly Weather Review*, 132 (8), 1917–1932.

Yepes, J., & Poveda, G. (2012). Diagnóstico y predictibilidad de la lluvia en Colombia a escala intraestacional.

Zhang, C., & Gottschalck, J. (2002). SST anomalies of ENSO and the Madden-Julian Oscillation in the equatorial Pacific. *Journal of Climate*, 15, 2429–2445. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2002\)015<2429:SAOEAT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2002)015<2429:SAOEAT>2.0.CO;2)

Zhao, Y., Laguna, R., Zhao, Y., Liu, J., Huang, X., Yianni, J., & Sarrigiannis, P. (2018). A wavelet-based correlation analysis framework to study cerebromuscular activity in essential tremor. *Journal of Healthcare Engineering*, 2018. <https://doi.org/10.1155/2018/7269494>

Biografía de los Autores



Aldair Enrique Romero Donado, Oficial de la Armada de Colombia con doble titulación en Oceanografía Física y Ciencias Navales, con conocimientos en interacción océano-atmósfera, sensores remotos, GIS, y análisis de datos hidrográficos. 5 años de experiencia laboral en seguridad y defensa marítima, investigación científica en oceanografía y protección marino costera. Ha trabajado en el ARC "Victoria" y ARC "Río Vichada", enfocándose en mitigar impactos medioambientales al integrar sistemas de radares y herramientas de búsqueda, asegurando vigilancia marítima y esfuerzos de conservación marina.



Juan Diego Rodríguez Ávila, Oficial de la Armada de Colombia con doble titulación en Oceanografía Física y Ciencias Navales, con conocimientos en interacción océano-atmósfera, operaciones marítimas de la Armada de Colombia, y Unidades Militares Ribereñas de la ONU para el restablecimiento de la Paz. 5 años de experiencia laboral en seguridad y defensa marítima, investigación científica en oceanografía y protección marino costera. Ha trabajado como Jefe del Departamento de Operaciones en la Estación de Guardacostas de Bahía Solano y Estación de Guardacostas de Santa Marta, contribuyendo a la protección de los intereses marítimos de la nación, contrarrestando los delitos transnacionales de narcotráfico, donde adelantó operativos con el fin de proteger el medio ambiente y los recursos marino-pesqueros en el Caribe y Pacífico Colombiano.



Angela Tatiana Rodríguez Tobar, Ingeniera Geógrafa y Ambiental, magister en Meteorología. Se ha desempeñado como investigadora y consultora en meteorología, climatología y oceanografía, con énfasis en procesos de interacción océano – atmósfera, meteorología marina, variabilidad climática tropical y antártica. Con trayectoria en docencia a nivel de pregrado y posgrado en áreas relacionadas con ciencias de la Tierra y atmosféricas.



Diana Patricia Herrera Moyano, Ingeniera ambiental y especialista en estadística aplicada, con más de nueve años de experiencia en investigación oceanográfica y docencia universitaria. Ha trabajado en el Centro de Investigaciones Oceanográficas e hidrográficas del Caribe, Escuela Naval de Suboficiales "ARC Barranquilla" y otros, enfocándose en análisis de datos meteomarineros, proyectos ambientales y publicaciones científicas, aportando soluciones a problemáticas del Caribe colombiano.

Descargo de responsabilidad/Nota del editor: Las declaraciones, opiniones y datos contenidos en todas las publicaciones son únicamente responsabilidad de los autores y colaboradores individuales y no reflejan necesariamente las opiniones de DERROTERO y/o de los editores. DERROTERO y/o los editores se deslindan de cualquier responsabilidad por daños o perjuicios a personas o bienes que puedan surgir como resultado de las ideas, métodos, instrucciones o productos mencionados en el contenido. Se recomienda a los lectores verificar de manera independiente la información antes de basarse en ella.