

Tendencias de largo plazo en la precipitación mensual sobre Colombia

Diana Zuluaga¹ y Germán Poveda²

¹Maestría en Ingeniería - Recursos Hídricos. Universidad Nacional de Colombia sede Medellín

²Departamento de Geociencias y Medio Ambiente. Universidad Nacional de Colombia sede Medellín

2 de septiembre de 2021

1. Introducción

En Colombia se ha estudiado la variabilidad hidroclimática en diversas escalas temporales [10, 11, 15, 19]. Según los autores, la variabilidad interanual de la precipitación está fuertemente modulada por la ocurrencia de El Niño/Oscilación del Sur (ENSO), y en menor medida por otros fenómenos macro-climáticos oscilatorios. El paso de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT) dos veces al año sobre el territorio de Colombia, marca las temporadas de lluvia (marzo-mayo y septiembre-noviembre) y las temporadas secas (diciembre-febrero y junio-agosto) en los Andes colombianos. Aunque el movimiento de la ZCIT modula de forma importante la variabilidad intra-anual de las lluvias sobre Colombia, es influenciada también por las corrientes en chorro del Chocó, Caribe y Orinoco, y por los Sistemas Convectivos de Mesoscala.

Se espera que el Cambio Climático genere cambios en el ciclo hidrológico, y por ende en el clima global. Huang *et al.* [7] sugieren dos escenarios para el trópico. El primero es que las lluvias se intensificarán en zonas donde el aumento en la temperatura superficial del océano excede el calentamiento medio superficial de los trópicos. Y el segundo, que las intensificaciones en las lluvias ocurrirán en regiones lluviosas. Wentz *et al.* [21] afirma que las regiones lluviosas serán más húmedas, y las menos lluviosas, más secas. A escalas regionales, los vientos determinan dónde hay aumento o disminución de la precipitación. Como el calentamiento de la atmósfera incrementa su capacidad para albergar humedad, si los vientos cambian poco en comparación con la humedad que transportan, las regiones húmedas importarán más agua [12]. Por esta razón es posible que haya más lluvias en estas regiones, y viceversa.

En Colombia se han estudiado las tendencias de largo plazo (más de 20 años de datos) de algunas variables hidroclimáticas para aportar evidencias sobre los efectos del Cambio Climático en la región [1, 3, 12, 14, 20]. Los resultados han mostrado una combinación de tendencias crecientes, decrecientes, y ausencia de tendencias significativas de la precipitación sobre el territorio de Colombia. También han mostrado patrones espaciales que no son

congruentes entre sí, y evidencias de la ausencia de una correlación entre la magnitud o el signo de las tendencias y la altitud [3, 12, 14, 20].

Estos estudios han incorporado diversas técnicas para extraer tendencias en series de tiempo. La Descomposición Empírica en Modos [5, 6] es una metodología usada para extraer los modos oscilatorios de una serie. En la literatura se ha reportado el uso de este método para identificar tendencias en series de tiempo [13, 22]. Estudios previos habían utilizado el método para hallar modos de variabilidad macro-climática en Colombia [2], pero no para identificar tendencias en series hidrológicas. Carmona y Poveda [2] aplicaron por primera vez esta metodología para detectar tendencias de largo plazo en la precipitación y otras variables climáticas en Colombia.

El presente trabajo aplicó la Descomposición Empírica en Modos para detectar tendencias de largo plazo en la precipitación mensual sobre Colombia. Datos satelitales de precipitación de 21 años (entre el 2000 y el 2021) fueron usados para este propósito. Los resultados arrojaron tendencias de la precipitación para: (1) las series mensuales completas, (2) series de cada mes y (3) series con promedios trimestrales. Los resultados permiten aportar al entendimiento de los efectos del Cambio Climático en la hidroclimatología de la región.

2. Materiales y Métodos

2.1. Área de estudio y datos

Se usó información satelital de precipitación de la base de datos de la NASA *Global Precipitation Measurement* (GPM) desde junio del 2020 hasta enero del 2021. Se utilizó el producto multi-satelital *precipitación final* del GPM, que entrega estimaciones de precipitación mensual en una cuadrícula de $0,1^\circ \times 0,1^\circ$ (aproximadamente $10 \times 10 \text{ km}$) sobre todo el planeta desde junio del 2000 hasta el presente [8]. La Figura 1 muestra el área de estudio ($13^\circ\text{N} - 5^\circ\text{S}; 80^\circ\text{W} - 66^\circ\text{W}$) marcada por el rectángulo rojo, que abarca toda la extensión geográfica continental de Colombia.

2.2. Métodos

2.2.1. Descomposición Empírica en Modos

La Descomposición Empírica en Modos [5, 6] es un método de análisis de series no estacionarias y no lineales. EMD realiza operaciones que descomponen una serie en modos denominados Funciones Intrínsecas de Modo (IMF, por sus siglas en inglés). Cada IMF debe satisfacer dos condiciones: (1) la diferencia absoluta entre el número de extremos y el número de cruces de cero debe ser a lo sumo uno, y (2) la media de las envolventes de los máximos y mínimos locales debe ser cero en cualquier punto. El proceso de descomposición funciona de la siguiente forma: (1) se detectan los máximos y los mínimos locales de la serie, (2) se construye una envolvente superior e inferior para los máximos y mínimos separadamente usando la interpolación *splines* cúbico, (3) se sustrae la media de las envolventes a la serie original, (4) se evalúa si la serie resultante es una IMF usando las condiciones anteriormente mencionadas, (5) se sustrae la IMF de la serie original, y (6) se repiten los pasos 1 al 5 hasta que el número de extremos del residuo sea menor o igual a uno [13]. La última IMF extraída corresponderá a la tendencia de la serie original.

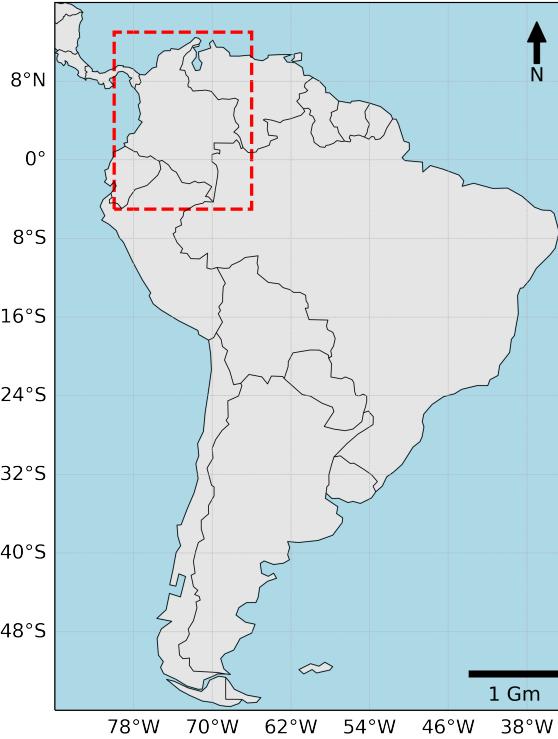


Figura 1: Zona de estudio demarcada por el rectángulo rojo ($13^{\circ}N - 5^{\circ}S$; $80^{\circ}W - 66^{\circ}W$).

2.2.2. Análisis de Tendencia

El test de Mann-Kendall es una prueba no paramétrica comúnmente utilizada para detectar tendencias temporales en series de tiempo climáticas e hidrológicas, que está basada en la suposición de independencia entre las observaciones. Sin embargo, las observaciones de las series temporales suelen estar autocorrelacionadas. La existencia de datos autocorrelacionados aumenta la probabilidad de encontrar tendencias que realmente no existen o no son estadísticamente significativas. El test de Mann-Kendall modificado [4] es una prueba de tendencia no paramétrica que es adecuada para datos autocorrelacionados. El estadístico S del test de Mann-Kendall modificado se calcula de acuerdo con la Ecuación 1.

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n sign(x_j - x_i), \quad (1)$$

donde

$$sign(x_j - x_i) = \begin{cases} +1 & \text{si } x_j - x_i > 0 \\ 0 & \text{si } x_j - x_i = 0 \\ -1 & \text{si } x_j - x_i < 0 \end{cases} \quad (2)$$

La varianza de S se define como

$$V_S = \left(\frac{n(n-1)(2n+5)}{18} \right) \left(\frac{n}{n_S} \right), \quad (3)$$

donde

$$\frac{n}{n_S} = 1 + \frac{2}{n(n-1)(n-2)} \sum_{i=1}^{n-1} (n-i)(n-i-1)(n-1-2)\rho_S(i), \quad (4)$$

donde n es el número de observaciones y $\rho_S(i)$ es la función de autocorrelación de los valores observados. El estadístico Z es usado como medida de significancia de la prueba Mann-Kendall. Se calcula como

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{V_S}} & \text{si } S > 0 \\ 0 & \text{si } S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{V_S}} & \text{si } S < 0 \end{cases} \quad (5)$$

El estimador Theil-Sen [17, 18] es un método no paramétrico que ajusta una línea a un conjunto de puntos en un plano, escogiendo la mediana de las pendientes de todos las líneas entre cada par de puntos. La magnitud de la tendencia de una serie de tiempo según la prueba Theil-Sen se calcula de acuerdo con la Ecuación 6.

$$\beta = \text{Mediana} \left(\frac{x_j - x_i}{j - i} \right), \quad j > i, \quad (6)$$

donde β es el estimador de la pendiente Theil-Sen. Un $\beta > 0$ indica una pendiente positiva en la serie de tiempo.

3. Resultados

La Descomposición Empírica en Modos (Sección 2.2.1) fue usada para extraer la tendencia de las 25521 series mensuales de precipitación del GPM. El *software* Python tiene disponible una implementación de la Descomposición Empírica en Modos y sus variaciones, llamada *EMD* [16], que fue usada para este propósito.

La Figura 2 muestra para una celda del conjunto de datos del GPM, su serie mensual de precipitación desde junio de 2020 hasta enero de 2021 (en negro) y las IMF obtenidas tras aplicar la Descomposición Empírica en Modos a la serie. Las primeras cuatro IMF representan los diferentes modos oscilatorios de la serie, que para propósitos de este estudio no serán analizados. La última *IMF* –en este caso, *IMF*₅– es la función residual de la serie. Para cada celda del GPM, se obtuvo la función residual a partir de la Descomposición Empírica en Modos. Esta función representa la tendencia de la serie original.

Las tendencias obtenidas a través de la Descomposición Empírica en Modos fueron evaluadas usando el test de Mann-Kendall modificado (Sección 2.2.2) para determinar su signo y significancia estadística. Para medir su magnitud, se aplicó el estimador Theil-Sen. Se usó el paquete de Python *PyMannKendall* [9] que permite aplicar el test de Mann-Kendall, Mann-Kendall modificado y otras variaciones. También permite obtener el estimador de la pendiente Theil-Sen.

La Figura 3 muestra los valores del estimador de la pendiente Theil-Sen en *mm/hr* para el área de estudio. Se excluyeron las tendencias que no fueron significativas de acuerdo con los resultados de la prueba Z (Sección 2.2.2) usando un intervalo de confianza del 95 %. Los valores rojos representan tendencias significativas crecientes, y los azules, decrecientes. La

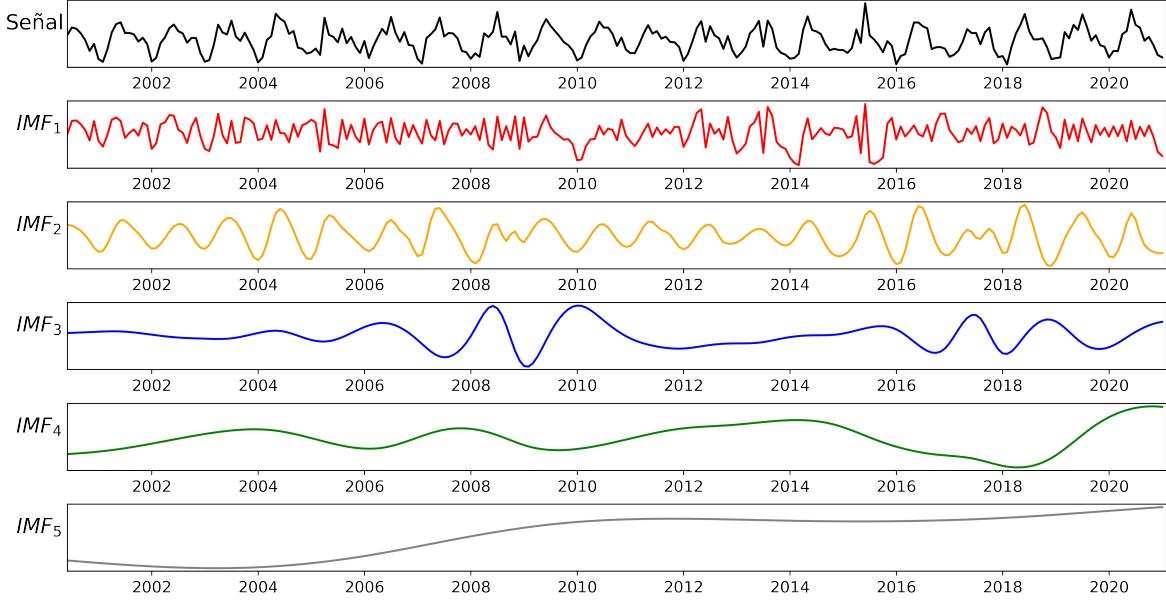


Figura 2: Descomposición Empírica en Modos de una serie de precipitación de la base de datos GPM. La serie original se muestra en negro y las Funciones Intrínsecas de Modo extraídas corresponden a la IMF_1 hasta la IMF_5 . La IMF_5 representa la tendencia de la serie.

intensidad del color es correlativa a la magnitud de la tendencia. Las pendientes se encuentran en un rango entre $-0,0022$ y $0,0018 \text{ mm/hr}$. Los valores más bajos se presentan en la costa pacífica colombiana y al este del Océano Pacífico. Las pendientes más altas se encuentran sobre el Océano Pacífico, al sur del istmo centroamericano. Tendencias no significativas, negativas y positivas se presentan sobre toda el área de estudio, con predominancia de las primeras. Aunque es difícil determinar un comportamiento claro en la tendencia de largo plazo de la precipitación, se puede observar una congruencia de las tendencias en un nivel más local.

Las series mensuales del GPM fueron agregadas trimestralmente en los siguientes trimestres: diciembre-febrero (DJF), marzo-mayo (MAM), junio-agosto (JJA) y septiembre-noviembre (SON). Se obtuvieron series estacionales, cada una con 21 registros (20 para el trimestre MAM). Cada registro se calculó como el promedio de los tres meses para un año y trimestre determinados.

La Descomposición Empírica en Modos, la prueba de Mann-Kendall modificada y el estimador Theil-Sen fueron aplicados en cada una de las cuatro series trimestrales. Los resultados del estimador Theil-Sen en mm/hr se muestran en la Figura 4. Al igual que para las series mensuales, únicamente se muestran las tendencias estadísticamente significativas de acuerdo con la prueba Z. La mínima pendiente se presenta en el trimestre SON con un valor de $-0,030 \text{ mm/hr}$ y la máxima en JJA con un valor $0,026 \text{ mm hr}$. Un factor común en los cuatro trimestres es la presencia de tendencias decrecientes importantes a lo largo de la costa pacífica colombiana. Otras características en la distribución de las tendencias no son comunes entre los cuatro trimestres. El Océano Pacífico –donde se encuentran las pendientes más fuertes– exhibe tendencias predominantemente negativas en los trimestres SON y DJF, y tendencias positivas y negativas en los trimestres MAM y JJA. A diferencia de los otros trimestres, JJA presenta un predominio de tendencias crecientes sobre el Océano Pacífico.

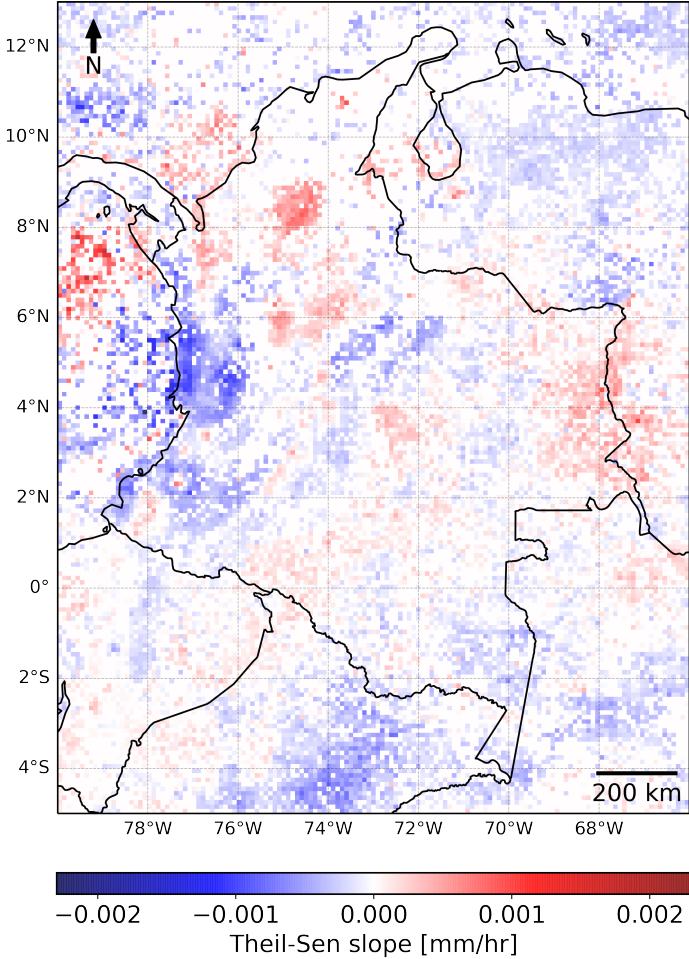


Figura 3: Mapa de la distribución del estimador de la pendiente Theil-Sen (en mm/hr) para las series mensuales de precipitación del GPM en Colombia desde junio del 2000 hasta enero del 2021. Los valores rojos indican tendencias positivas y los azules, negativas. La magnitud de la pendiente es correlativa a la intensidad del color. Las tendencias no significativas no fueron incluidas.

Como el análisis estacional puede agrupar tendencias mensuales opuestas, se realizó un análisis para cada uno de los meses del año. Las series del GPM fueron filtradas por cada uno de los 12 meses. La Descomposición Empírica en Modos, el test de Mann-Kendall modificado y el estimador Theil-Sen fueron aplicados a las nuevas series.

Los resultados de las magnitudes de las tendencias estadísticamente significativas para los 12 meses se muestran en la Figura 5. Las tendencias presentan magnitudes entre los $-0,070$ y $0,058\ mm/hr$ para septiembre y julio, respectivamente –valores por encima de los presentados en los mapas anteriores–. Se observa que las tendencias más fuertes ocurren en el Océano Pacífico. El resto del territorio presenta tendencias débiles en comparación, a excepción de algunas zonas en el mar Caribe durante junio, noviembre y diciembre. El trimestre mayo-junio muestra una particularidad en el signo de las tendencias sobre el Pacífico: son mayoritariamente positivas. La región Pacífica muestra una predominancia de tendencias negativas en la mayoría de los meses, a excepción de febrero y mayo. Tendencias contrarias ocurren entre el pacífico y la costa pacífica en algunos meses.

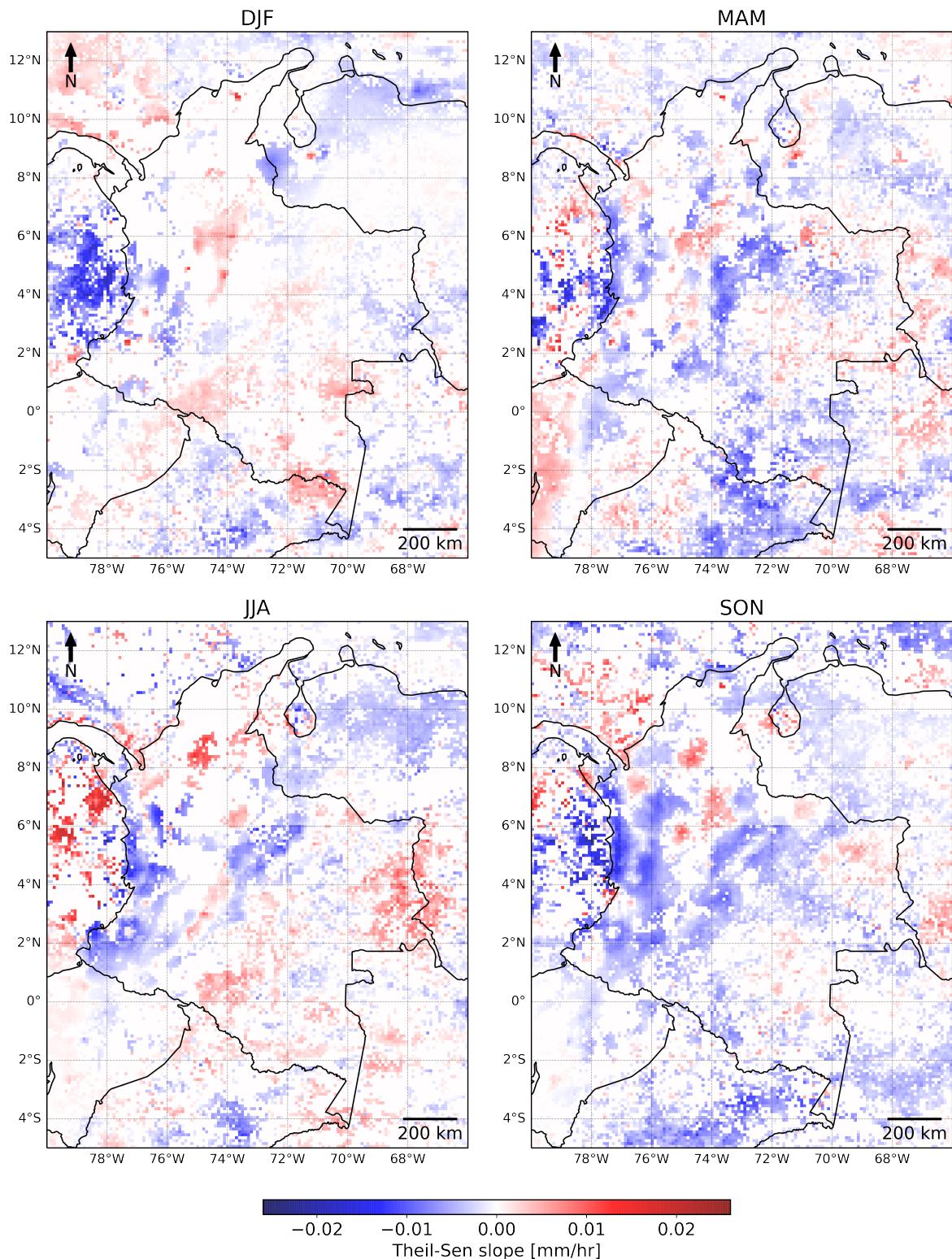


Figura 4: Mapa de la distribución del estimador de pendiente Theil-Sen (en mm/hr) para las series estacionales calculadas con datos mensuales del GPM para Colombia, entre junio del 2020 y enero del 2021.

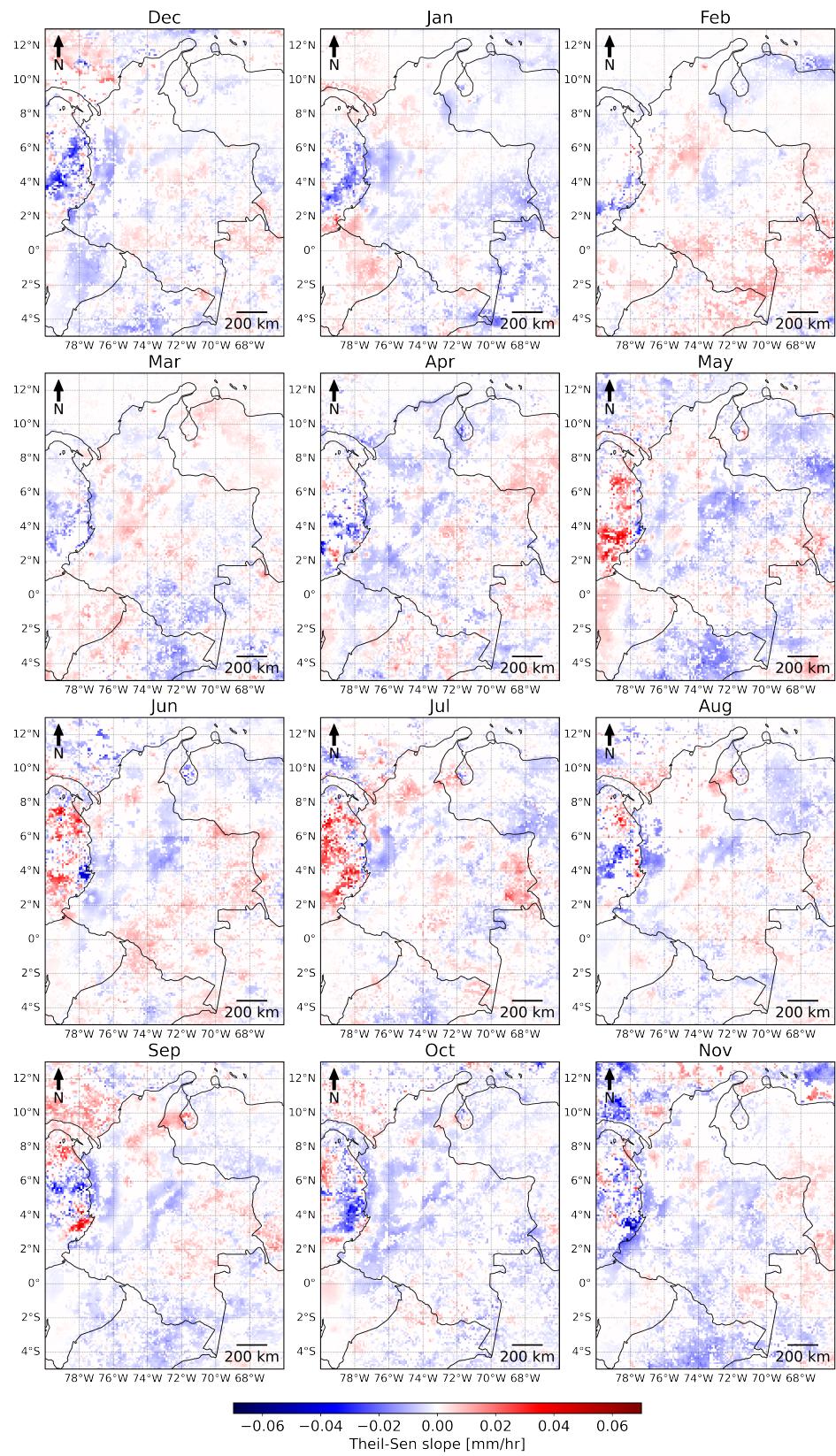


Figura 5: Mapa de la distribución del estimador de pendiente Theil-Sen (en mm/hr) para las series del GPM en cada mes para Colombia, desde junio del 2000 hasta enero del 2021.

Series	Registros	Sin tendencia [%]	Negativa [%]	Positiva [%]
Completas	248	54.1	29.4	16.5
DJF	21	59.6	24.5	15.8
MAM	20	53.3	32.1	14.6
JJA	21	61.5	21.4	17.1
SON	21	55.9	36.0	8.1
Jan	21	54.2	31.9	13.9
Feb	20	58.7	17.4	23.9
Mar	20	54.8	20.9	24.3
Apr	20	54.3	29.3	16.4
May	20	52.2	31.8	15.9
Jun	21	55.9	22.6	21.5
Jul	21	58.5	22.4	19.2
Aug	21	63.1	23.8	13.1
Sep	21	53.7	31.1	15.2
Oct	21	56.1	33.5	10.4
Nov	21	56.7	30.9	12.4
Dec	21	57.6	27.9	14.5

Cuadro 1: Porcentaje de tendencias no significativas, negativas y positivas con respecto al total de series para el análisis de las series completas, trimestrales y mensuales.

El Cuadro 1 muestra el porcentaje de series con tendencias negativas, positivas o no significativas, con respecto al total de las series analizadas. Los resultados se obtuvieron a partir del test de Mann-Kendall modificado para las series completas, trimestrales y mensuales. En las 17 series predominan las tendencias no significativas, y en segundo lugar las negativas (a excepción de febrero y marzo).

4. Discusión y Conclusiones

La Descomposición Empírica en Modos (Sección 2.2.1) fue aplicada en 25521 series mensuales de precipitación sobre Colombia del GPM durante 2000-2021 para extraer sus tendencias de largo plazo. Las tendencias fueron analizadas usando el test de Mann-Kendall modificado para determinar su signo y significancia estadística, y el estimador Theil-Sen para cuantificar su magnitud (Sección 2.2.2). Los análisis se realizaron: (1) sobre las series completas, (2) para cada mes y (3) para las series promediadas trimestralmente.

(CHIRPS) Los resultados presentados (Cuadro 1 y Figuras 3, 4 y 5) muestran que la mayoría de las series (más del 50%) no presentan tendencias significativas, lo que es congruente con lo expuesto por Cantor [1], Mesa *et al.* [12] y Vuille *et al.* [20]. Con respecto a las tendencias que fueron significativas según un intervalo de confianza del 95 %, las tendencias decrecientes fueron predominantes. Este comportamiento es opuesto a lo presentado por Mesa *et al.* [12] en su mapa de tendencias usando información de precipitación de *Climate Hazards Center InfraRed Precipitation with Station data* entre los años 1981 y 2013. Según sus resultados, la tendencia significativa predominante fue positiva.

De acuerdo con lo expuesto por Carmona y Poveda [3], las tendencias positivas más fuertes se presentaron en la costa pacífica colombiana. Según Huang *et al.* [7] y Wentz *et al.*

[21], se espera que como consecuencia del Cambio Climático, las regiones históricamente lluviosas como el Pacífico colombiano [15], sean aún más lluviosas. Los resultados de este trabajo reflejan lo opuesto. Según las Figuras 3 y 4, las tendencias negativas más fuertes se presentaron en esa región. Esa fue la única característica espacial común entre las tendencias de los cuatro trimestres. Un resultado similar presentó Mesa *et al.* [12] cuando comparó las tendencias obtenidas a partir de estaciones meteorológicas y datos satelitales. Las tendencias tuvieron comportamientos contrarios entre ambas bases de datos. La diferencia en la forma en la que se registra la información puede facilitar la ocurrencia de este tipo de incongruencias. Las estaciones meteorológicas entregan registros de un punto geográfico específico, mientras que cada registro de una base de datos satelital representa el promedio de una celda geográfica.

Los patrones espaciales presentados en las Figuras 3 y 4 no fueron congruentes con lo expuesto por Cantor [1], Carmona y Poveda [3], Pabón [14] y Vuille *et al.* [20]. Pero al comparar ambas figuras con el campo de tendencias significativas de la precipitación de Mesa *et al.* [12], se observan algunos patrones en común. Tendencias crecientes ocurren en ambos campos al norte de la región Andina, el Urabá y los Llanos colombo-venezolanos. Otras zonas no presentan congruencias importantes. Además, la distribución presentada por Mesa *et al.* [12] tiene un alto porcentaje de tendencias no significativas, que no lo son en este estudio. Ambos estudios tuvieron diferencias en la base de datos usada, la metodología aplicada para extraer las tendencias y el periodo de estudio. Es posible que las señales del Cambio Climático sobre la precipitación no sean los suficientemente claras como para mostrar resultados congruentes entre diferentes estudios cuando el desarrollo metodológico difiere.

La Figura 5 muestra una dinámica importante en las tendencias de la lluvia sobre el Pacífico. Los resultados indican una disminución de lluvias durante los meses agosto-abril –vista también en las Figuras 3 y 4–, y un aumento durante el trimestre mayo-julio. ¿Podrían estos resultados reflejar un debilitamiento del Chorro del Chocó o un fortalecimiento de la fase cálida del ENSO durante agosto-abril, y lo contrario durante mayo-julio? Estos hallazgos reflejan una clara dependencia del signo y la magnitud de las tendencias con la temporada del año. Análisis usando las series completas pueden esconder información importante sobre el comportamiento de las tendencias.

Este trabajo se constituye como un aporte al entendimiento de los efectos del Cambio Climático en la hidrología de Colombia. La evidencia pasada y la expuesta en este estudio muestran que no hay un patrón espacial y temporal uniforme en las tendencias de largo plazo de la precipitación. Hay algunas características espaciales comunes en los resultados reportados en la literatura, pero no hay evidencias claras sobre un aumento o disminución de las lluvias a causa del Cambio Climático. Queda aún mucho por explorar para consolidar una hipótesis clara sobre el efecto del Cambio Climático en las lluvias de la región. Análisis adicionales son necesarios, que permitan diferenciar entre periodicidades de largo plazo y el efecto real del Cambio Climático sobre la hidroclimatología de Colombia.

Referencias

- [1] D. Cantor. Evaluación y análisis espaciotemporal de tendencias de largo plazo en la hidroclimatología colombiana. Master's thesis, Universidad Nacional de Colombia, Colombia, 2011.

- [2] A. Carmona. Identificación de modos principales de variabilidad hidroclimática en Colombia y la Cuenca Amazónica mediante la Transformada de Hilbert-Huang. Master's thesis, Universidad Nacional de Colombia, Colombia, 2010.
- [3] A. Carmona and G. Poveda. Detection of long-term trends in monthly hydro-climatic series of Colombia through Empirical Mode Decomposition. *Climatic Change*, 122:301–313, 2014.
- [4] K. Hamed and R. Rao. A modified Mann-Kendall trend test for autocorrelated data. *Journal of Hydrology*, 204:182–196, 1998.
- [5] N. Huang, Z. Shen, S. Long, M. Wu, H. Shih, Q. Zheng, N.-C. Yen, C. Tung, and H. Liu. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 454:903–995, 1998.
- [6] N. Huang and Z. Wu. A review on Hilbert-Huang transform: Method and its applications to geophysical studies. *Reviews of Geophysics*, 46:1–23, 2008.
- [7] P. Huang, S. Xie, K. Hu, G. Huang, and R. Huang. Patterns of the seasonal response of tropical rainfall to global warming. *Nature Geoscience*, 6:357–361, 2013.
- [8] G. Huffman, E. Stocker, D. Bolvin, E. Nelkin, and J. Tan. Gpm imerg final precipitation l3 1 month 0.1 degree x 0.1 degree v06. Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (GES DISC), 2019. Accessed: 2021-04-20.
- [9] M. Hussain and I. Mahmud. pymannkendall: a python package for non parametric mann kendall family of trend tests. *Journal of Open Source Software*, 4:1556, 2019.
- [10] F. Mejía, O. Mesa, G. Poveda, J. Vélez, C. Hoyos, R. Mantilla, J. Barco, A. Cuartas, B. Botero, and M. Montoya. Distribución espacial y ciclos anual y semianual de la precipitación en colombia. *Dyna*, 127, 1999.
- [11] O. Mesa, G. Poveda, and L. Carvajal. Introducción al Clima de Colombia. Technical report, Universidad Nacional de Colombia, 1997.
- [12] O. Mesa, V. Urrea, and A. Ochoa. Trends of Hydroclimatic Intensity in Colombia. *Climate*, 9, 2021.
- [13] M. Molla, Md.K.I.and Rahman, A. Sumi, and P. Banik. Empirical Mode Decomposition Analysis of Climate Changes with Special Reference to Rainfall Data. *Discrete Dynamics in Nature and Society*, 2006:1–17, 2006.
- [14] J. Pabón. El cambio climático global y su manifestación en Colombia. *Cuadernos de Geografía*, 12:111–119, 2003.
- [15] G. Poveda. La hidroclimatología de Colombia: una síntesis desde la escala inter-decadal hasta la escala diurna. *Rev. Acad. Colomb. Cienc.*, 28:201–222, 2004.
- [16] A. Quinn. Python implementation of empirical mode decomposition algorithm. <https://gitlab.com/emd-dev/emd>, 2019.

- [17] P. Sen. Estimates of the Regression Coefficient Based on Kendall's Tau. *Journal of the American Statistical Association*, 63:1379–1389, 1968.
- [18] H. Theil. A rank-invariant method of linear and polynomial regression analysis. i, ii, iii. *Nederl. Akad. Wetensch., Proc.*, 53:386–392, 1950.
- [19] V. Urrea, A. Ochoa, and O. Mesa. Seasonality of Rainfall in Colombia. *Water Resour. Res.*, 55:4149–4162, 2019.
- [20] M. Vuille, R. Bradley, M. Werner, and F. Keimig. 20th Century Climate Change in the Tropical Andes: Observations and Model Results. *Climatic Change*, 59:75–99, 2003.
- [21] F. Wentz, L. Ricciardulli, K. Hilburn, and C. Mears. How much more rain will global warming bring? *Science*, 317:233–235, 2007.
- [22] Z. Wu, E. Schnieder, and Z.-Z. Hu. The Impact of global warming on enso variability in climate records. Technical report, Center for Ocean-Land-Atmosphere Studies, 2002.