TecnoLógicas

Análisis de tendencias e índices de extremos hidroclimáticos en el nordeste antioqueño a partir de registros históricos

Analysis of Trends and Hydroclimatic Extreme Indices in Northeastern Antioquia from Historical Records

Lilia María Marín-Zapata[1]; Alejandro Builes-Jaramillo[1]; Hernán D. Salas[2]; Carlos Arturo Hoyos-Restrepo[1]

[1]Institución Universitaria Colegio Mayor de Antioquia, Medellín-Colombia
[2]Instituto Tecnológico Metropolitano, Medellín-Colombia

Correspondencia: hernansalas@itm.edu.co

Recibido: 29 Julio 2025 **Aceptado:** 20 marzo 2026 **Disponible:** 22 Abril 2026

Cómo citar / How to cite
L. M. Marín-Zapata, A. Builes-Jaramillo, H. D. Salas, and C. A. Hoyos-Restrepo, "Análisis de tendencias e índices de extremos hidroclimáticos en el nordeste antioqueño a partir de registros históricos," *TecnoLógicas*, vol. 29, no. 65, e3586, 2026.
https://doi.org/10.22430/22565337.3586

CC BY NC SA

Resumen

El cambio climático modifica la hidroclimatología global y aumenta los riesgos sociales, ambientales y económicos. En Colombia, la variabilidad climática y la falta de datos dificultan su análisis y predicción. El objetivo de este estudio fue evaluar las señales de cambio climático encontradas en registros hidroclimatológicos históricos. La metodología empleada consistió en el análisis de tendencias en series temporales en el Nordeste de Antioquia, a través de la prueba Mann-Kendall y utilizando índices climáticos extremos del ETCCDI para precipitación y temperatura (rx1d, rx5d, Rx95p, Rx99p, TXx, TNn, TN10p, TX90p, DTR). Los resultados evidenciaron un aumento significativo en la temperatura y la precipitación de hasta 0,34 °C y 21,7 mm por década, respectivamente. Además, el índice r95p mostró que entre el 31,1 % y el 41,1 % de la precipitación anual está asociada a lluvias extremas. En particular, el municipio de Cisneros exhibió un aumento significativo en TXx y TX90p mientras TN10p evidenció cambios en los patrones hidroclimáticos históricos. Finalmente, se concluye que el diagnóstico de la influencia del cambio climático en variables hidroclimatológicas en regiones tropicales es crucial para la toma de decisiones en diversos sectores productivos y ambientales en torno a los recursos hídricos y las estrategias de planeación regional y municipal.

Palabras clave

Cambio climático, hidrología, precipitación, ríos, temperatura.

Abstract

Climate change modifies global hydroclimatology and increases social, environmental, and economic risks. In Colombia, climate variability and lack of data hinder its analysis and prediction. The objective of this study was evaluating the climate change signals found in Northeast Antioquia (Colombia) using historical hydroclimatological records. The methodology consisted of the analysis of trends using the Mann-Kendall test and ETCCDI extreme climate indices for precipitation and temperature (rx1d, rx5d, Rx95p, Rx99p, TXx, TNn, TN10p, TX90p, DTR). Our results revealed a significant increase in temperature and precipitation of up to 0,34 °C and 21,7 mm per decade, respectively. In addition, the r95p index showed that between 31,1% and 41,1% of annual precipitation is associated with extreme rainfall. In particular, the municipality of Cisneros exhibits a significant increase in TXx and TX90p while TN10p evidenced changes in historical hydroclimatic patterns. Finally, we can conclude that the diagnosis of climate change influences hydroclimatic variables in tropical regions and is crucial for decision making for diverse productive and environmental sectors related to water resources and strategies of regional and local management.

Keywords

Climate change, hydrology, precipitation, rivers, temperature.

1. INTRODUCCIÓN

La influencia humana en el clima terrestre se manifiesta a un ritmo sin precedentes en los últimos 200 años. Durante este período, los registros históricos muestran las mayores alteraciones, y las simulaciones de modelos climáticos globales respaldan la hipótesis de alteraciones antropogénicas [1]. En este sentido, existe evidencia de que la temperatura media de la superficie global en el periodo 2011-2020 fue 1,09°C más alta que en el periodo 1850-1900, con mayor aumento sobre áreas continentales de 1,59 °C, que sobre el océano 0,88 °C [2]. El incremento sostenido de la temperatura global resulta especialmente relevante, dado que un sistema climático en calentamiento modifica los patrones de ocurrencia, magnitud, distribución espacial y persistencia de eventos meteorológicos y climas extremos, tales como olas de calor, sequías e inundaciones entre otros [3], [4]. Además, a nivel regional, las modificaciones en las condiciones del suelo tienen el potencial de atenuar o intensificar los efectos del calentamiento, y de influir en la intensidad, frecuencia y duración de los extremos hidroclimáticos [5], [6], cuya naturaleza y extensión varían según la ubicación geográfica y la época del año [7]. En consecuencia, estas transformaciones del sistema climático plantean la necesidad de fortalecer e implementar políticas públicas orientadas a anticipar y gestionar los riesgos asociados con la salud pública, los medios de vida, la seguridad alimentaria, la disponibilidad del recurso hídrico y la seguridad humana en general [8].

El cambio climático se refiere a las alteraciones del clima terrestre atribuidas directa o indirectamente a la actividad humana y que persisten durante largos periodos de tiempo, generalmente decenios o períodos más largos [9]. La adaptación al cambio climático implica el diagnóstico y caracterización adecuadas del clima regional y local, así como sus potenciales efectos; donde la vulnerabilidad juega un papel importante en función de que nos permite identificar la predisposición a verse afectado negativamente y la falta de capacidad en sí mismo para hacer frente y adaptarse [10]. En este sentido, la transformación de ecosistemas naturales para desarrollar actividades agrícolas, ganaderas, minería y otros fines de uso del suelo presentan un desafío significativo en las regiones para la adaptación al cambio climático [11]- [13]. Por tal razón, promover la preservación, recuperar y garantizar el uso responsable de la biodiversidad y los ecosistemas es una estrategia efectiva para conservar los servicios ambientales que forman parte de una estrategia integral para abordar la adaptación, mitigación y la reducción de riesgos de desastres en la región [14].

Aunque el cambio climático está relacionado con el cambio en la media a largo plazo de las variables hidroclimatológicas, es necesario avanzar en el entendimiento del cambio en los eventos extremos, pues estos producen impactos en la sociedad humana y los ecosistemas [15]. La identificación de la causa detrás de los cambios en la precipitación extrema en escalas regionales no es una tarea sencilla, debido a la existencia de una significativa variabilidad

natural en el clima terrestre y a la escasez de registros de observación confiables y de larga duración [16]. Resulta fundamental comprender las razones detrás de los cambios observados y realizar proyecciones precisas para la planificación efectiva de la adaptación al cambio climático en el futuro [17].

Colombia muestra una marcada variabilidad climática en diversas escalas temporales y espaciales debido a su posición tropical, situada entre el océano Pacífico y el mar Caribe. Además, se ve influenciada por la humedad proveniente de la cuenca amazónica, la cual abarca un 40 % del área continental del país [18]-[20]. La presencia de la cordillera de los Andes condiciona el clima tanto a nivel local como regional, lo que dificulta el diagnóstico, modelación y predicción de eventos climáticos en diversas escalas temporales [21], características que hacen que Colombia sea uno de los países altamente vulnerables a los impactos del clima [22], [23]. Investigaciones previas en Colombia han identificado tendencias significativas en temperatura y cambios en la variabilidad y distribución espacial de la precipitación, con señales heterogéneas a escala regional y local [17], [22], [23]. Estudios nacionales han documentado incrementos térmicos durante la segunda mitad del siglo XX y proyecciones de calentamiento para el siglo XXI [24], así como una distribución espacial no uniforme de las señales de cambio climático en el territorio colombiano, con contrastes marcados entre regiones andinas, Caribe y Pacífica [25]. Asimismo, se han reportado modificaciones espacio–temporales en la precipitación, variabilidad interanual asociada a forzantes climáticos de gran escala y tendencias de largo plazo en series hidroclimáticas mensuales mediante metodologías robustas de análisis temporal [26], [27]. En conjunto, estos resultados evidencian que las señales de cambio climático en Colombia no son espacialmente homogéneas y que su detección depende tanto de la escala de análisis como de la calidad y continuidad de los registros observacionales. Por ello, la identificación de señales climáticas a escala subregional requiere análisis espaciales más finos y enfoques multitemporales, especialmente en regiones tropicales de alta variabilidad climática [28], [29].

En particular, la localización de Antioquia en la zona ecuatorial de Sur América influye en las temperaturas promedio de sus regiones, con temperaturas altas en el rango 29,4 -27,3 °C en la parte bajas de Urabá y de los valles de los ríos Magdalena, Cauca, Porce y Nechí donde las temperaturas bajas reportadas varían de 6,24 a 9,03 °C en lugares como los páramos de Sonsón, Belmira y Frontino, condiciones que favorecen una variedad de pisos térmicos y ecosistemas estratégicos que le permiten contar con una enorme biodiversidad [30].

Por lo anterior, este estudio estuvo motivado por las preguntas de investigación: (1) ¿Los registros hidroclimáticos históricos en el Nordeste Antioqueño exhiben tendencias significativas?; (2) ¿Los índices de extremos del ETCCDI para precipitación y temperatura muestran cambios significativos para el periodo histórico?; (3) ¿pueden asociarse los cambios en las variables hidroclimáticas con los cambios de cobertura vegetal en la zona de estudio? Para abordar estas preguntas, en este estudio se analizaron los registros históricos observacionales del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) en búsqueda de evidencias de la influencia del cambio climático en las variables precipitación, temperatura, caudales e indicadores de eventos extremos. Además, con esta investigación se pretende identificar zonas y patrones geoespaciales con tendencias en las variables hidroclimáticas para contribuir a la comprensión de aspectos relacionados con el cambio climático en la región, refinando la escala de estudios previos e incorporando estimaciones de valores extremos para suministrar así resultados que sirvan como línea base para la toma de decisiones de orden regional y municipal, y contribuir a los esfuerzos del gobierno nacional y departamental en lo relacionado con la influencia del cambio climático a escala regional y sus potenciales consecuencias sobre las comunidades, la biodiversidad y sus servicios ecosistémicos así como diversos aspectos económicos [10].

2. DATOS Y METODOLOGÍA

2.1 Zona de estudio

La subregión Nordeste del departamento de Antioquia está localizada sobre el margen de la cordillera Central, al sureste de la serranía de San Lucas y entre los ríos Porce, Nechí, Nus y Alicante. Limita al norte con el departamento de Bolívar y la subregión del Oriente antioqueño; al oriente con el Magdalena Medio; y al occidente con la subregión Norte (Figura 1). Cuenta con una extensión aproximada de 8 544 km^2, equivalente al 13,6 % del territorio departamental, lo que la posiciona como la segunda subregión con mayor área dentro de Antioquia. Su territorio está conformado por diez (10) municipios que son: Amalfi, Anorí, Cisneros, Remedios, San Roque, Santo Domingo, Segovia, Vegachí, Yalí y Yolombó, con una población proyectada para el 2022 de 202 261 habitantes [31]-[33]. Entre ellos, destacan Segovia y Remedios por su localización en la serranía de San Lucas, un enclave geográfico para la actividad minera. En estos municipios la dinámica económica se sustenta principalmente de la extracción de oro; particularmente, Segovia ha registrado el 39,4 % de la producción aurífera regional y el 6,66 % a nivel nacional, consolidándose como el principal productor de oro del país [34], [35]. Adicionalmente, en 2018, se pudo determinar que hasta el 23 % de la deforestación en Antioquia se asocia a minas legales (productoras de oro) [36]. Estos atributos de la zona son referentes que podrían dar lugar a un aumento de la vulnerabilidad frente a los desafíos que implica la adaptación del cambio climático.

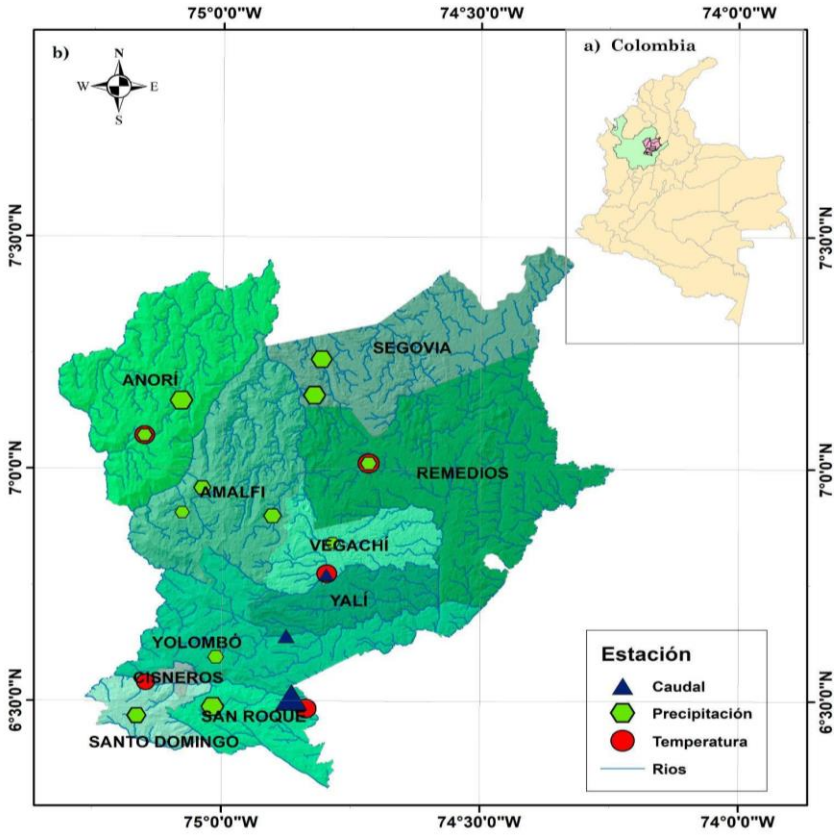

Figura 1. Zona de estudio. (a) región del Nordeste Antioqueño en el contexto nacional y departamental. (b) Municipios y estaciones de observación de variables hidroclimáticas. Fuente: elaboración propia.

2.2 Datos de precipitación y temperatura

Se utilizaron 20 estaciones hidroclimatológicas para el periodo 1987-2020 (33 años) del IDEAM [37]. en escala temporal diaria (Tabla 1). De estas estaciones, 12 corresponden a registros de precipitación (mm), 3 de caudal (m^3/s) y 5 de temperatura (media, máxima y mínima en °C).

Tabla 1. Descripción general de las estaciones hidroclimatológicas del IDEAM. Fuente: adaptado de [37].

Código referencia IDEAM	Cod. Propio	Nombre estación	Variable (unidad)	Municipio
23080390	P1	Santo Domingo	Precipitación (mm)	Santo Domingo
23080760	P2	San Roque	Precipitación (mm)	San Roque
23100030	P3	El Tigre	Precipitación (mm)	Vegachí
23100040	P4	Yolombó	Precipitación (mm)	Yolombó
27010850	P5	Amalfi	Precipitación (mm)	Amalfi
27010890	P6	Cueva Santa	Precipitación (mm)	Amalfi
27010960	P7	Monos Hacienda	Precipitación (mm)	Amalfi
27011100	P8	Las Brisas	Precipitación (mm)	Segovia
27020170	P9	Hacienda El Carmen	Precipitación (mm)	Anorí
27025030	P10	Anorí	Precipitación (mm)	Anorí
23175020	P11	Aeropuerto Otú	Precipitación (mm)	Remedios
27030140	P12	La Palma De Coco	Precipitación (mm)	Segovia
23087160	Q1	Caramanta	Caudal (m^3/s)	San Roque
23107040	Q2	Vegachí	Caudal (m^3/s)	Vegachí
23107030	Q3	Mascota	Caudal (m^3/s)	Yalí
23085080	T1	Granja El Experimental Nus	Temperatura (°C)	San Roque
23105030	T2	Vegachí	Temperatura (°C)	Vegachí
23175020	T3	Aeropuerto Otú	Temperatura (°C)	Remedios
27015190	T4	Guayabito	Temperatura (°C)	Santo Domingo
27025030	T5	Anorí	Temperatura (°C)	Anorí

2.3 Datos de coberturas vegetales

Los datos de la cobertura vegetal son tomados de la información geoespacial del IDEAM correspondiente al tema de biodiversidad, subtema (Cambio Cobertura), Nombre Capa (Cambio de bosques), para para el periodo 1990 a 2018 [38].

2.4 Metodología

La metodología empleada consistió en: procesamiento de datos hidroclimáticos y control de calidad, cálculo de índices de extremos, análisis de tendencias y análisis geoespacial de cambios de coberturas, los cuales se describen detalladamente a continuación.

2.4.1 Procesamiento de datos de las variables hidroclimatológicas y control de calidad

Se analizaron las series de tiempo de las variables precipitación, caudal y temperaturas media, máxima y mínima considerando el mayor periodo de registros común y verificando en los datos su consistencia, homogeneidad y porcentaje de datos faltantes. Con este fin se utilizó

el promedio aritmético simple, de modo que los datos faltantes del día i para un año j, fueron llenados con el promedio multianual de los días i con registros disponibles. El porcentaje de datos faltantes para las estaciones de precipitación, caudal y temperatura media, obtenidos en este estudio, fue de 4,0 %, 7,3 % y 31,2 %, respectivamente, mientras que para el caso de las temperaturas máximas y mínimas el porcentaje de datos faltantes fue de 32 % y 18,7 %, respectivamente. El procesamiento de los datos se hizo en el software Excel®.

2.4.2 Cálculo de índices extremos

Los índices de extremos son parámetros estadísticos utilizados en climatología para cuantificar y analizar eventos climáticos excepcionales, como olas de calor, períodos de lluvias intensas o sequías prolongadas. Estos sirven como métricas para la evaluación de la frecuencia, intensidad y duración de estos eventos, permitiendo entender los patrones de variabilidad climática, cambio climático y sus impactos [39]. El Equipo de Expertos en Detección e Índices del Cambio Climático (ETCCDI), ha establecido un conjunto de 27 índices basados en observaciones diarias de la temperatura y precipitación, los cuales se calculan para valores anuales de forma estandarizados para facilitar su comparación, el análisis, predicciones y proyecciones de la variabilidad, así como los cambios en el sistema climático a nivel global y regional [40], [41]. El ETCCDI fue creado como iniciativa por la Organización Meteorológica Mundial y el Programa Mundial de Investigaciones Climáticas debido a la carencia de datos climáticos globales de series largas y uniformes, así como la ausencia de una definición estandarizada de indicadores y límites para estos eventos en distintos países [42]. En Tabla 2 se presentan los Índices de precipitación y temperatura extrema recomendados por el ETCCDI, que se utilizaron en este estudio [43]. El cálculo de los índices se hizo en el software Excel®.

Tabla 2. Índices de precipitación y temperatura extrema ETCCDI. Fuente: [40].

ID	Nombre del Índice	Descripción	Unidad
rx1d	Cantidad máxima de precipitación en 1 día	Precipitación máxima en 1 día	mm
rx5d	Cantidad máxima de precipitación en 5 días	Precipitación máxima en 5 días	mm
Rx95p	Días muy húmedos	Precipitación total anual > Percentil 95	mm
Rx99p	Días extremadamente húmedos	Precipitación total anual de días > Percentil 99	mm
TXx	Temperatura máxima	Valor máximo anual de la temperatura máxima diaria	°C
TNn	Temperatura mínima	Valor mínimo anual de la temperatura mínima diaria	°C
TN10p	Noches frescas	Días en que la TN < percentil 10	%
TX90p	Días cálidos	Días en que TX > percentil 90	%
DTR	Temperatura diurna	Diferencia media mensual entre las temperaturas máxima y mínima diarias	°C

2.4.3 Análisis estadístico de tendencias

Para el cálculo de las tendencias de las variables de la Tabla 1. Se utilizó la prueba de Mann-Kendall modificada por Hamed y Rao [44] con una temporalidad mensual y para los índices extremos presentados en la Tabla 2 se aplicó la misma prueba, pero con una temporalidad anual. Siendo esta una prueba de tendencias no paramétricas ampliamente utilizada en estudios para corregir la autocorrelación de los datos [45], [46]. Las tendencias se calcularon con el paquete pymannkendall 1.4.3 en la versión 3.4 de Python.

2.4.4 Análisis geoespacial entre tendencias hidroclimáticas y los cambios de cobertura vegetal

Para analizar la cobertura vegetal se seleccionó la capa del Ráster correspondiente a la categoría de Bosque no bosque, para el periodo 1990 a 2018 [38]. De dicha información, se reclasifican las leyendas de los datos correspondientes a las coberturas de bosque estable, regeneración y deforestación, asignando un valor de 0 para las leyendas de bosque estable y reforestación y 1 para deforestación. Posteriormente, se buscaron coincidencias entre los valores mediante una diferencia entre el periodo anterior y el periodo actual (ej. cobertura vegetal en 1990 menos cobertura vegetal en 2018). El resultado de la diferencia entre lo asignado como bosque estable, reforestación y deforestación (0-1) entregó valores de los píxeles correspondientes a la clasificación de 0, 1, -1 [42]. Los valores de los píxeles de la categoría -1 están relacionados con la deforestación, dato que se utilizó para el análisis del comportamiento de la cobertura vegetal de la zona. Finalmente, los píxeles etiquetados con -1 se contabilizan para determinar el área de deforestación para cada municipio. El software utilizado fue ArcGis Desktop 10.8 (ArcMap) [47].

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Análisis de series hidroclimáticas

La Tabla 3 muestra los promedios de las estaciones correspondientes a las variables de precipitación (mm) y temperatura (°C) e incluye los valores de las pendientes de las tendencias y su significancia estadística. Se puede observar que las estaciones de precipitación mostraron valores promedio de precipitación para la región por encima de 2 500 mm anuales, y que las estaciones correspondientes a los municipios de Anorí, San Roque y Segovia (P9, P2, P8, P12) presentaron lluvias superiores a 3 900 mm) por año mientras que las estaciones de temperatura de los municipios Remedios y San Roque (T3 y T1) presentaron temperaturas superiores a los 28 °C promedio anual.

Además, la Figura 2a y la Tabla 3 muestran las tendencias y significancias para las estaciones de precipitación en la región, indicando que de las doce (12) estaciones dos presentan tendencias crecientes significativas (16 % de las estaciones) y tres (25 % de las estaciones) exhibieron tendencias decrecientes no significativas. Los municipios de Santo Domingo (P1) y Remedios (P11) presentaron tendencias crecientes significativas, respectivamente.

Por otro lado, en la Figura 2b y Tabla 3 se muestran los promedios anuales de temperatura de (5) estaciones y (3) estaciones de caudales, con sus correspondientes tendencias y significancia. Se puede observar que las estaciones de temperatura presentaron tendencias crecientes significativas hasta de 0,34°C por década, siendo los municipios de Cisneros (T4) y Anorí (T5) los que presentaron una mayor tendencia creciente (hasta 0,78 y 0,40°C por década). Por otra parte, los caudales (m^3/s) presentan dos (2) estaciones (Q1 y Q3 de los municipios de San Roque y Yolombó) que mostraron tendencias crecientes significativas.

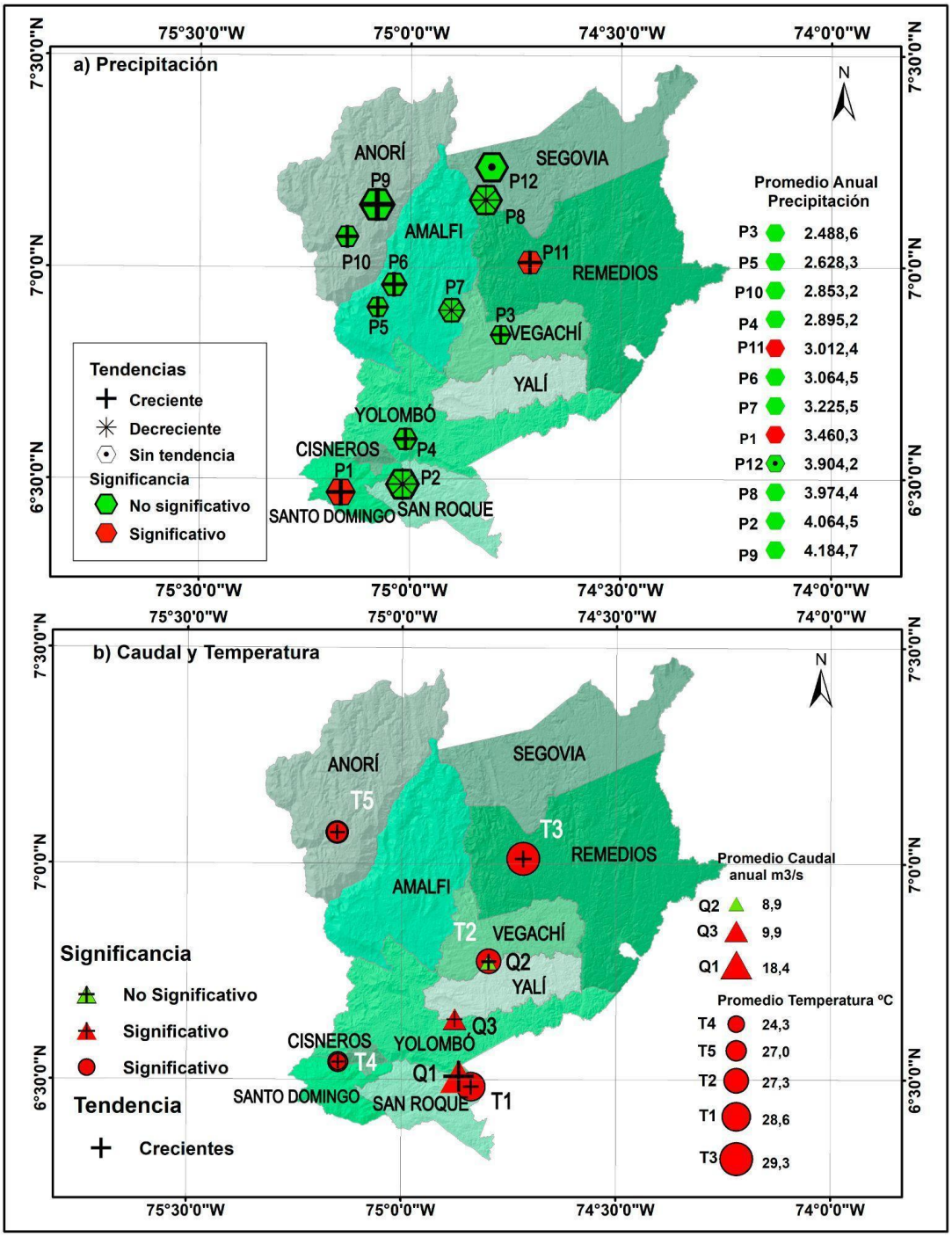

Figura 2. Distribución espacial de las tendencias significativas y no significativas para las variables hidroclimáticas en la región Nordeste Antioqueño. (a) Precipitación. (b) Caudal y temperatura. Fuente: elaboración propia.

Tabla 3. Promedios acumulados anuales y valores de las pendientes de las tendencias.
Fuente: elaboración propia.

Estación	Promedio Anual	Variable (Unidad)	Pendiente mensual	Cambio anual	Cambio década	Cambio en 33 años
P1	3.461,4	(mm)	0,06*	0,82	8,17	26,94
P2	4.064,7	(mm)	-0,156	-1,87	-18,66	-61,59
P3	2.489,3	(mm)	0,043	0,52	5,21	17,19
P4	2.897,3	(mm)	0,150	1,81	18,06	59,59
P5	2.628,1	(mm)	0,053	0,63	6,32	20,87
P6	3.064,5	(mm)	0,043	0,51	5,14	16,96
P7	3.223,5	(mm)	-0,045	-0,54	-5,42	-17,87
P8	3.974,4	(mm)	-0,048	-0,58	-5,79	-19,09
P9	4.187,7	(mm)	0,367	4,40	44,00	145,20
P10	2.853,8	(mm)	0,039	0,46	4,64	15,33
P11	3.012,5	(mm)	0,18*	2,18	21,77	71,86
P12	3.904,2	(mm)	-	-	-	-
T1	28,6	°C	0,002*	0,02	0,24	0,78
T2	27,3	°C	0,001*	0,01	0,15	0,49
T3	29,3	°C	0,002*	0,02	0,18	0,60
T4	27,1	°C	0,006*	0,08	0,78	2,57
T5	24,3	°C	0,003*	0,04	0,40	1,32
Q1	18,4	m^3/s	0,011*	0,13	1.33	4.39
Q2	9,3	m^3/s	0,000	0,00	0,01	0,03
Q3	9,0	m^3/s	0,008*	0,09	0,94	3,11

Las variaciones observadas en precipitación, temperatura y caudales evidencian cambios significativos en el clima local que son fundamentales para la toma de decisiones a escala municipal. En particular, las alteraciones encontradas inciden directamente en la gestión del riesgo, la planificación del uso del suelo y el diseño de estrategias ambientales, por lo que comprender estos cambios permite anticipar escenarios de amenaza a escala municipal, ajustar instrumentos de ordenamiento territorial y fortalecer la resiliencia de los sistemas naturales y productivos frente a la variabilidad y el cambio climático.

3.2 Análisis de índices extremos

3.2.1 Tendencias en extremos de precipitación

La Tabla 4 presenta los valores de los índices extremos para la precipitación y de las pendientes de las tendencias calculadas. Los resultados asociados al índice r95p mostraron que aproximadamente entre el 31,1 % y 41,1 % de la precipitación media anual en la región corresponde al promedio de las lluvias por encima del percentil 95 y aproximadamente entre el 10 % y 25 % corresponde a la contribución de las lluvias en los días por encima del percentil 99 %. En general, los índices de eventos extremos presentaron una tendencia a aumentar, por lo que se espera un mayor porcentaje de la lluvia correspondiente a los percentiles 95 y 99, al igual que una mayor precipitación extrema en periodos cortos de 1 y 5 días.

Tabla 4. Tendencias en los índices extremos de precipitación. Fuente: elaboración propia.

Estación	Percentil 95 (mm)	Promedio anual r95p (mm)	Pendiente	Percentil 99 (mm)	Promedio anual r99p (mm)	Pendiente	Promedio anual rx1d (mm)	Pendiente	Promedio anual rx5d (mm)	Pendiente
P1	40,0	1128,7	10,9	69,0	347,7	4,5	96,3	0,211	171,4	-0,211
P2	48,0	1303,4	-2,9	83,0	648,1	-1,4	116,7	-0,578	212,8	0,32
P3	35,0	1022,5	5,5	65,0	299,1	4,9	102,1	0,38	163,7	0,20
P4	37,5	1011,7	9,8*	67,0	291,6	7,6*	99,2	0,39	166	1,76*
P5	33,0	874,0	6,0	56,0	171,0	0,0	83	0,50	154,8	1,43
P6	38,0	1063,7	0,4	67,0	305,9	0,0	108,5	0,2	176,7	-0,62
P7	43,0	1246,8	40,3*	82,0	755,0	27,3*	98,6	0,00	196,8	3,08
P8	55,0	1468,4	-3,8	92,0	987,1	-7,2	124,3	-0,35	222,6	-1,13
P9	52,0	1438,5	31,4*	90,0	987,1	16,5*	124,7	-0,218	240,7	1,375
P10	33,0	893,4	8,2	58,0	213,3	0,1	78	0,222	136,7	0,014
P11	41,9	1158,6	21,1*	77,0	510,4	11,4*	108,6	1,31*	191,8	2,45*
P12	56,0	1440,2	1,7	92,0	994,6	5,1	126,6	0,083	212,5	-0,56

*Tendencias significativas

La Figura 3 muestra los índices extremos de precipitación presentados en la Tabla 2. Se observó que los índices (r99p) y (r95p) en las estaciones (P4, P7, P9, P11 de los municipios de Yolombó, Amalfi, Anorí y Remedios) mostraron tendencias crecientes estadísticamente significativas hasta de 206,9 mm por década. Así mismo, se observó que para los índices de (rx1d) y (rx5d) en la estación P11 del municipio de Remedios hubo tendencias crecientes significativas hasta de 13,1 mm y 24,5 mm por década, respectivamente, indicando cambios en la magnitud y/o frecuencia de la precipitación. Algunas estaciones sugieren tendencias decrecientes, pero estadísticamente no significativas. Estas tendencias en los índices de extremos de precipitación sugieren un cambio en la ocurrencia de lluvias extremas, lo que podría llevar a eventos de escorrentía súbita, inundaciones a largo plazo, saturación del suelo, entre otros [47], [48].

3.2.2 Tendencias en extremos de temperatura

En la Tabla 5 se presentan los índices extremos de temperatura y sus tendencias anuales, mientras que la Figura 4 muestra la distribución espacial de los resultados. A continuación, se describen los resultados para cada municipio: San Roque (T1) presentó una tendencia creciente significativa en el índice extremo de porcentaje de días cálidos (TX90p); Vegachí (T2) exhibió una tendencia creciente significativa en el índice extremo de temperaturas mínimas más bajas (TNn). Además, el índice de porcentaje de días con noches frescas (TN10p) mostró una tendencia decreciente significativa, lo que indica una disminución en la frecuencia de noches frescas; Remedios (T3) mostró una tendencia creciente en el índice de variabilidad diaria de la temperatura (DTR), siendo estadísticamente significativa; Cisneros (T4) presentó tendencias crecientes y significativas en los índices de temperatura máxima (TXx), así como en el porcentaje de días cálidos (TX90p). Por otro lado, el índice de noches frescas (TN10p) presentó una tendencia decreciente significativa, indicando una reducción en las temperaturas nocturnas; finalmente en Anorí (T5) se observaron tendencias decrecientes en el índice de temperaturas máximas (TXx). Asimismo, el índice de variabilidad diaria de la temperatura (DTR) presentó una tendencia decreciente significativa durante el periodo de referencia.

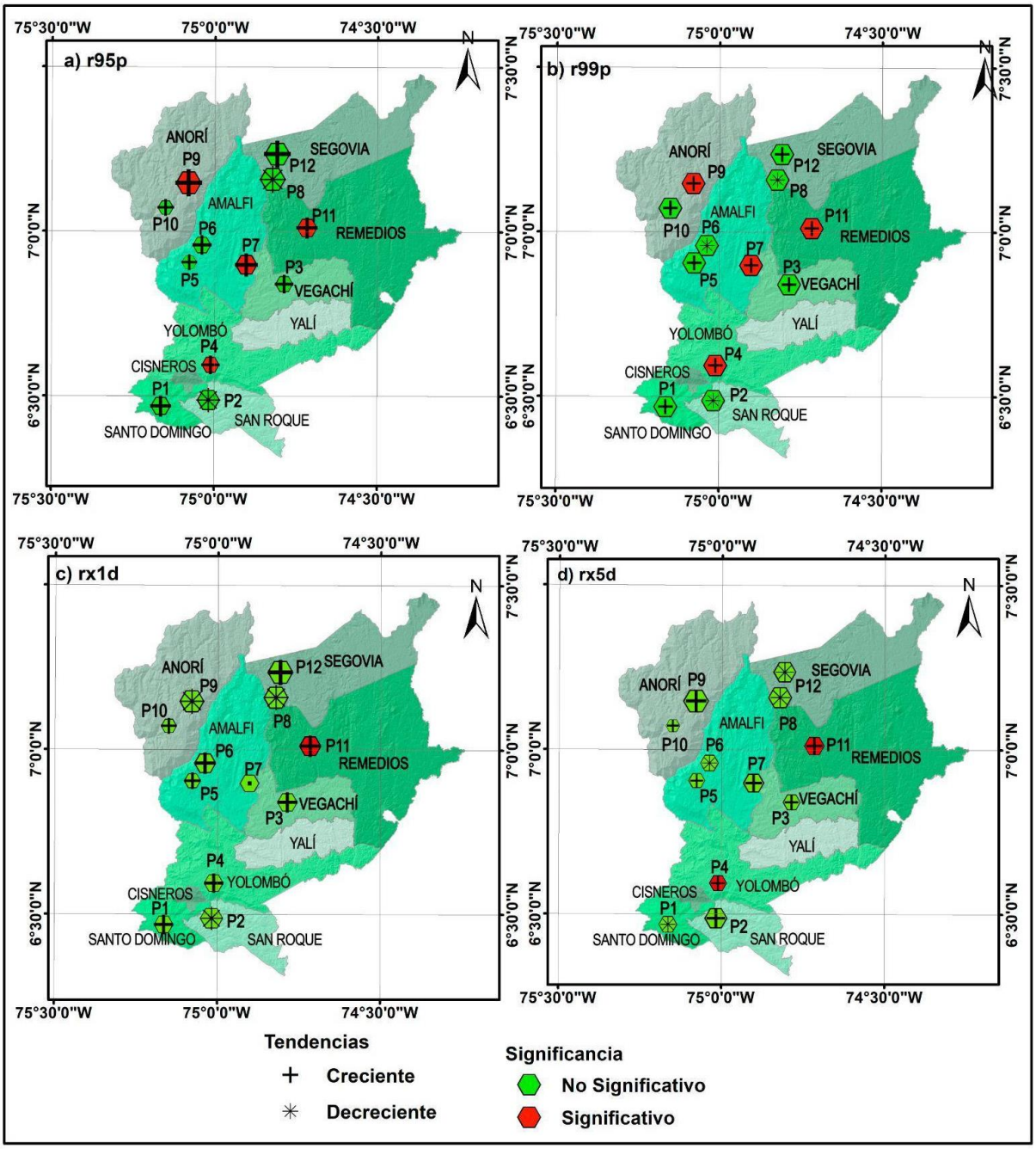

Figura 3. Distribución espacial en la región Nordeste de las significancias y tendencias para los índices extremos de precipitación. (a) r95p. (b) r99p. (c) rx1d. (d) rx5d. Fuente: elaboración propia.

Tabla 5. Tendencias en los índices extremos de temperatura. Fuente: elaboración propia.

Esta-ción	Prome-dio anual TXx (°C)	Pen-diente	Prome-dio anual TNn (°C)	Pen-diente	Per-centil Tx90p	Prome-dio anual Tx90p (%)	Pen-diente	Per-centil TN10p (°C)	Prome-dio anual TN10p (%)	Pen-diente	Prome-dio anual DTR	Pen-diente
T1	32,3	0,03	15,2	0,0	30	13,18	0,005*	17,6	10,7	-0,001	15,3	0,0
T2	31,1	-0,03	14,1	0,05	29	10,9	-0,0005	16,6	11,8	-0,004*	14,7	-0,05*
T3	32,6	0,07	17	0,0	31	10	0,0064	18,8	11,8	0,002	13,9	0,05*
T4	31,9	0,09*	13,1	0,02	30	10,6	0,007*	15	14,6	-0,005*	16,9	0,06
T5	27,4	-0,09*	12,8	0,07	25.5	10	-0,003	14,6	10,8	-0,002	12,1	-0,10*

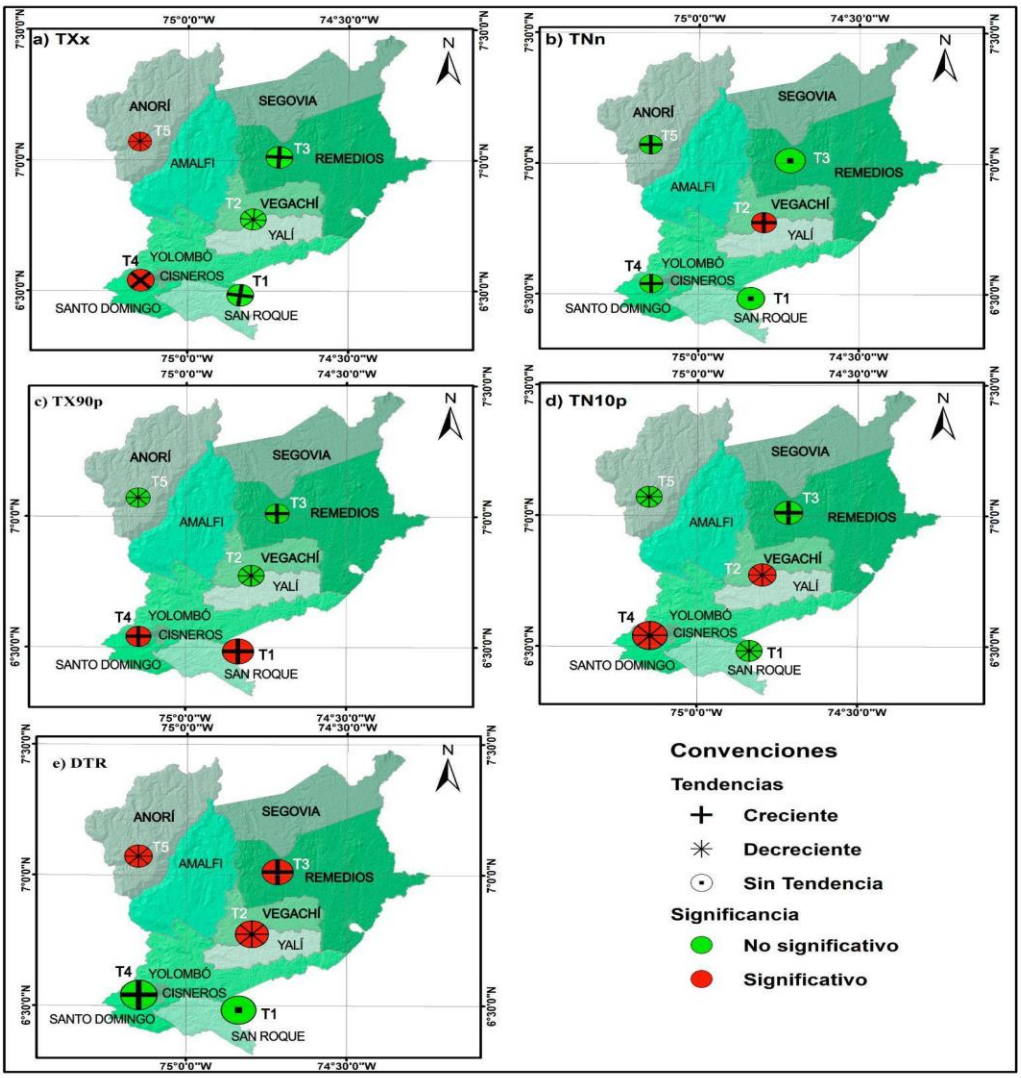

Figura 4. Distribución espacial en la región Nordeste de las significancias y tendencias para los índices extremos de temperatura. (a) TXx, (b) TNn, (c) TX90p, (d) TN10p, DTR (d. Fuente: elaboración propia.

Nuestros resultados sugieren variaciones significativas en los patrones climáticos locales, tales como alteraciones en la frecuencia de temperaturas extremas nocturnas, cambios en la amplitud térmica diaria y un incremento en los extremos de temperatura máxima y mínima. Aunque no todas las tendencias observadas son estadísticamente significativas, la mayoría de

los datos muestran indicios claros de cambios climáticos locales. Estos cambios podrían tener repercusiones negativas importantes en diversos ámbitos. En la agricultura, el aumento de temperaturas extremas puede reducir la productividad de los cultivos sensibles al calor, incrementar la evapotranspiración y modificar los ciclos fenológicos de las plantas, como lo sugieren estudios realizados en regiones tropicales similares [49], [50]. En términos de salud humana, el aumento de las noches cálidas y la disminución de las noches frescas incrementa el riesgo de enfermedades relacionadas con el calor, especialmente en comunidades vulnerables que no tienen acceso a sistemas de enfriamiento adecuados [51], [52].

Asimismo, el impacto en el medio ambiente y la biodiversidad podría ser considerable, dado que un incremento en los extremos de temperatura puede afectar la distribución de especies, sus patrones de migración y la disponibilidad de recursos [53], [54]. La variabilidad diaria de la temperatura (DTR) también juega un papel importante, ya que una menor diferencia entre temperaturas máximas y mínimas puede influir negativamente en el crecimiento de ciertos cultivos y alterar procesos biológicos críticos en los ecosistemas [55].

Estos cambios también tienen implicaciones en la economía local, ya que las alteraciones en los patrones de temperatura extrema pueden afectar la producción agrícola y la disponibilidad de agua, incrementando los costos de adaptación para comunidades rurales [56]-[58]. Por último, estos patrones afectan la gestión de los recursos naturales y los servicios ecosistémicos, complicando la planificación y la implementación de estrategias de adaptación climática [59]. Por tal razón, los resultados en términos de extremos climáticos son un insumo para la toma de decisiones respecto a las amenazas y riesgos climáticos que deben considerarse en los instrumentos de ordenamiento territorial.

Por otra parte, se puede observar que cada municipio presenta tendencias tanto crecientes y decrecientes estadísticamente significativas, lo que indica que las variaciones climáticas a nivel local pueden estar influenciadas por múltiples potenciales factores, entre ellos: cambio climático, cambio en los patrones de circulación atmosféricos locales, alteraciones debido a la presión sobre los recursos naturales por aumento poblacional y/o cambios de cobertura de suelo [60].

3.2.3 Cambios en la cobertura vegetal y su asociación con cambios hidroclimáticos

La deforestación es uno de los principales motores de la degradación ambiental en regiones tropicales, afectando directamente la capacidad de captura de carbono y exacerbando los efectos del cambio climático. Estudios recientes subrayan la importancia de evaluar los cambios de cobertura vegetal para entender el impacto bioclimático en zonas de alta vulnerabilidad climática [61]-[63]. Se cuantificó la pérdida de cobertura vegetal en la zona de estudio para el periodo de 1990 a 2018. En total, la subregión del Nordeste Antioqueño presentó una disminución de la deforestación de 28.851 Ha, respecto a la presentada en el periodo de 1990. Para el periodo de 2018 se observaron 5.226 Ha de deforestación, correspondiente al 1,7 %, respecto al área del año 1990 que era de 34.077 Ha, equivalente a 8,4 %. Siendo los municipios de Remedios, Segovia y Anorí, aquellos con una mayor área de deforestación para el periodo de 2018, 1.984,3 Ha (37,9 %),1.640,5 Ha (31,3 %) y 640,5 Ha (12,2 %) respectivamente. En la Tabla 6 se muestran las hectáreas deforestadas en los diferentes municipios de la zona de estudio (de mayor a menor magnitud).

Tabla 6. Deforestación, precipitación promedio y estaciones hidroclimáticas por municipio. Fuente: elaboración propia.

Municipio	Altitud (m.s.n.m)	Deforestación Ha	Precipitación anual promedio (mm)	Estaciones de precipitaciones	Estaciones de temperatura
Remedios	700	1984,3	3012,5	P11*	T3*
Segovia	1005	1640,5	3939,3	P8-P12	-
Anorí	1535	640,5	3520,7	P9-P10	T5*
Amalfi	1550	317,8	2972,0	P5-P6-P7	-
Vegachí	980	281,1	2489,3	P3	T2*
Yalí	1250	164,0	2218,0	-	-
Yolombó	1450	157,5	2897,3	P4	-
San Roque	1475	35,3	4064,7	P2	T1*
Santo Domingo	1975	5,7	3461,4	P1*	T4*
Cisneros	1050	0,0	3015,0	-	
Total		5.226,8			

*Cambios significativos

No obstante, la interpretación de asociaciones entre cambios en la cobertura vegetal y variables hidroclimáticas a escala local debe abordarse con cautela. Estudios recientes basados en teledetección y análisis multitemporal han demostrado que la respuesta climática a la pérdida de cobertura vegetal no es lineal ni espacialmente homogénea, especialmente en regiones tropicales caracterizadas por una alta variabilidad climática natural y una marcada heterogeneidad del paisaje [64]–[66]. En particular, [67] evidencian que los cambios observados en variables climáticas superficiales frente a la deforestación dependen de múltiples factores concurrentes, tales como la escala espacial de análisis, el periodo temporal considerado, la topografía, la latitud y la interacción con factores climáticos de gran escala. Resultados similares han sido documentados en estudios recientes que muestran que la dinámica de la vegetación y su relación con el clima responde a procesos multicausales y no lineales, lo que dificulta la identificación de patrones consistentes cuando se analizan a escalas regionales o municipales [64], [68]. En este contexto, la ausencia de relaciones claras entre la deforestación y los índices hidroclimáticos extremos no necesariamente indica la inexistencia de una interacción, sino que refleja la complejidad de los procesos atmosféricos y biofísicos que operan de manera simultánea a diferentes escalas espaciales y temporales.

La Figura 5 muestra la distribución espacial de la deforestación en la región de estudio. Se observa que algunos municipios presentan cambios no sólo en términos de deforestación, sino también variaciones significativas en las precipitaciones y las temperaturas a lo largo del tiempo. Por ejemplo, el municipio de Remedios registró una deforestación de 1 984,3 Ha, junto con un aumento significativo en la caída de 21,7 mm por década y un incremento en la temperatura de 0,18 °C por década. De manera similar, el municipio de Santo Domingo presentó una deforestación de 5,7 Ha, con un aumento en la precipitación de 8,7 mm y en la temperatura de 0,78 °C durante el mismo período. Estos datos sugieren que la deforestación podría estar influyendo en los cambios de temperatura de la superficie en la zona de estudio [69].

Estos resultados son consistentes con estudios previos que reportan una deforestación de 9 751 Ha en 2021 en la zona nororiental de Antioquia, específicamente en municipios como El Bagre, Zaragoza, Cáceres, Anorí, Amalfi, Segovia, Remedios, Yondó, Vegachí y Yalí, los cuales concentran los principales focos de pérdida de bosques [70], [71]. Además, dichos estudios sugieren que el aumento de la temperatura atmosférica podría dar lugar a un incremento en las precipitaciones [72], [73], debido a la mayor capacidad de la atmósfera para retener humedad [74]. Por lo tanto, en un clima más cálido, es esperable que los eventos de

precipitación extrema sean más frecuentes, lo que incrementa el riesgo de inundaciones y avenidas torrenciales [75]. No obstante, es importante señalar que estos cambios en la precipitación, el caudal y la temperatura también podrían estar influenciados por la variabilidad climática a escalas interanuales e interdecadales [76].

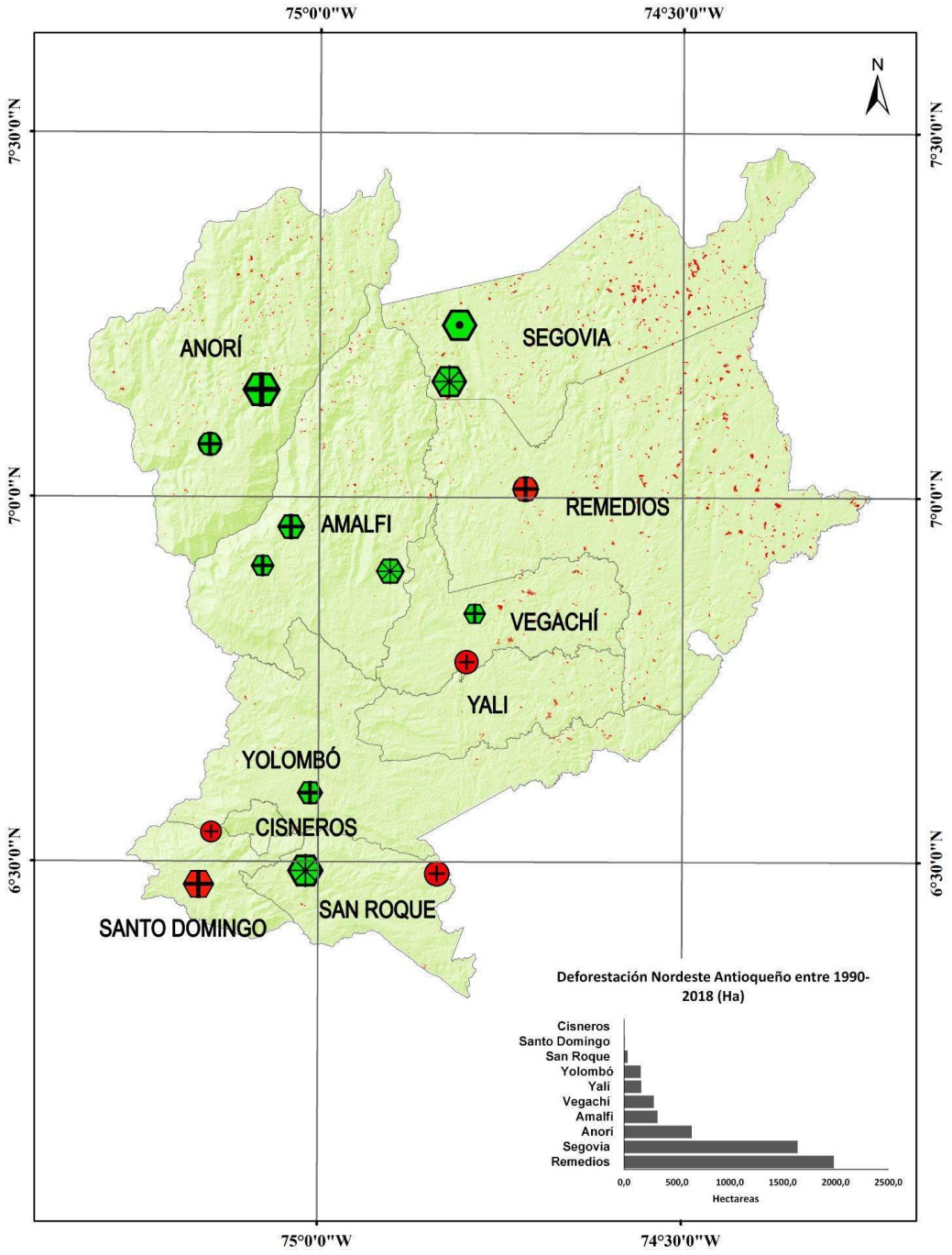

Figura 5. Mapa de pérdida de cobertura vegetal.
Fuente: elaboración propia.

Además, un factor importante de la subregión es su actividad minera (exploración y explotación del material aurífero) [26], que a su vez está vinculada con la deforestación y la

temperatura, la cual tiene influencia donde la temperatura global del aire en la superficie a la deforestación depende de la latitud, donde la deforestación en latitudes altas aumenta la probabilidad de disminución de la temperatura y en altitudes bajas aumenta la probabilidad de incremento de la temperatura y que la respuesta en latitudes medias es mixta [61]. Esto podría estar asociado a las tendencias presentadas en el municipio de San Roque (T1) (1475 m.s.n.m), Vegachi (T2) (980 m.s.n.m), Remedios (T3) (700 m.s.n.m), Santo Domingo (T4) (1975 m.s.n.m) y Anorí (T5) (1535 m.s.n.m) [31]. No obstante, nuestros análisis no muestran una asociación clara entre la deforestación y los índices de extremos climáticos, lo cual puede deberse a que las variaciones climáticas están influenciadas por múltiples efectos causales, entre ellos: el cambio climático global, patrones de circulación atmosférica, uso del suelo, entre otros, cuyos patrones de asociación local son complejos.

4. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

Este estudio permite identificar tendencias relevantes sobre las señales de cambio climático en la subregión Nordeste Antioqueño, destacando el aumento en temperaturas extremas (hasta 0,78 °C por década) y cambios significativos en la precipitación (hasta 21,7 mm por década), asociados tanto a la variabilidad climática natural como a factores antrópicos. Este resultado concuerda con estudios previos que resaltan la influencia de la deforestación en la dinámica climática regional, amplificando el calentamiento local y la frecuencia de eventos extremos. La deforestación, cuantificada en un 8,4 % en 1990 y reducida a un 1,7 % en 2018, demuestra un progreso en la mitigación de la pérdida de cobertura vegetal.

El análisis de los índices extremos de temperatura y precipitación evidencia variaciones hidroclimáticas que difieren entre municipios y que no están exclusivamente vinculadas a la deforestación, sino también a otros cambios en el uso del suelo (cambio climático global, cambio en los patrones de circulación atmosférica, densidad poblacional de cada uno de ellos y/o cambios de cobertura de suelo). Nuestros resultados evidencian cambios en los extremos climáticos, pero la causalidad detrás de nuestros hallazgos sigue siendo una pregunta abierta. En este sentido, aunque se analizó la deforestación en cada municipio de la subregión y su asociación con las alteraciones climáticas, sigue siendo una pregunta abierta puesto que no se encontraron patrones claros al respecto.

Este trabajo contribuye al diagnóstico climático, como línea base para la toma de decisiones orientadas a fortalecer las estrategias de adaptación al cambio climático, orientadas a mitigar el impacto de los eventos extremos, principalmente en las comunidades rurales y ecosistemas de la región. Finalmente, se concluye que es crucial promover políticas que busquen la preservación de la cobertura vegetal y la gestión sostenible del recurso hídrico, como parte de una estrategia integral de resiliencia climática. Adicionalmente, la heterogeneidad de los resultados encontrados muestra la importancia de implementar redes de monitoreo que ayuden a caracterizar patrones locales de variabilidad en cuencas sin medición. Respecto a la relación entre las tendencias, índices de extremos, cambios en la cobertura, los efectos causales y sus patrones de asociación local son complejos y merecen mayor investigación futura.

5. AGRADECIMIENTO Y FINANCIACIÓN

El trabajo de L. M. M. Z fue posible gracias a la Institución Universitaria Colegio Mayor de Antioquia, “Convocatoria institucional para la conformación del banco de proyectos de investigación científica desarrollo tecnológico e innovación – 2021”, proyecto FAI112. El trabajo de A. B. J y C. A. H fue posible gracias a la Institución Universitaria Colegio Mayor de Antioquia. El trabajo de H. D. S fue posible gracias al Departamento de Ciencias Ambientales y de la Construcción, Institución Universitaria ITM. Este trabajo fue posible gracias a la financiación de

los proyectos FAI112 y FAI118 “Convocatoria institucional para la conformación del banco de proyectos de investigación científica desarrollo tecnológico e innovación – 2021”. Agradecemos a IDEAM por la información geoespacial del IDEAM (http://www.ideam.gov.co/capas-geo) y los datos hidro-climáticos de Colombia.

6. REFERENCIAS

[1] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), *Climate change 2021 – the physical science basis: Working group I contribution to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change,* V. Masson-Delmotte *et al.*, Eds. Cambridge, U.K: Cambridge University Press, 2021. https://doi.org/10.1017/9781009157896

[2] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), “Technical Summary,” in *Climate Change 2022 – Impacts, Adaptation and Vulnerability*, Cambridge, U.K: Cambridge University Press, 2023, pp. 37–118. https://doi.org/10.1017/9781009325844.002

[3] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), “Summary for Policymakers,” in *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, C. B. Field *et al.*, Eds. Cambridge, U.K: Cambridge University Press, 2012, pp. 1-19. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/SREX_FD_SPM_final-2.pdf

[4] W. Zhang *et al*., “Weather and climate extremes hitting the globe with emerging features,” *Adv. Atmos. Sci.*, vol. 41, no. 6, pp. 1001-1016, Jun. 2024. https://doi.org/10.1007/s00376-024-4080-3

[5] Y. Xing, W. P. J. Yumiao, W. Peili, S. Justin, and A. O. Jason, “A global transition to flash droughts under climate change,” *Science*, vol. 380, no. 6641, pp. 187-191, Apr. 2023. https://www.science.org/doi/10.1126/science.abn6301

[6] D. Lawrence, M. Coe, W. Walker, L. Verchot, and K. Vandecar, “The Unseen Effects of Deforestation: Biophysical Effects on Climate,” *Front. For. Glob. Change*, vol. 5, Mar. 2022. https://doi.org/10.3389/ffgc.2022.756115

[7] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), “Summary for Policymakers,” in *Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems*, Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2019, pp. 14-36. https://doi.org/10.1017/9781009157988.001

[8] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), “Summary for Policymakers,” in *Global Warming of 1.5°C*, V. Masson-Delmotte *et al.*, Eds. Cambridge, U.K: Cambridge University Press, 2018, pp. 3-24. https://doi.org/10.1017/9781009157940.001

[9] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), *Climate Change 2007: Synthesis Report*, Core Writing Team, R. K. Pachauri, and A. Reisinger, Eds. Geneva, Switzerland: IPCC, 2007. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/ar4_syr_full_report.pdf

[10] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), “Summary for Policymakers,” in *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability*, H.-O. Pörtner *et al.*, Eds. Cambridge, U.K: Cambridge University Press, 2022, pp. 3-33. https://doi.org/10.1017/9781009325844.001

[11] R. B. L. Cavalcante, P. R. M. Pontes, P. W. M. Souza-Filho, and E. B. de Souza, “Opposite Effects of Climate and Land Use Changes on the Annual Water Balance in the Amazon Arc of Deforestation,” *Water Resour. Res.*, vol. 55, no. 4, pp. 3092-3106, Apr. 2019. https://doi.org/10.1029/2019WR025083

[12] M. E. Siqueira Silva, G. Pereira, and R. P. da Rocha, “Local and remote climatic impacts due to land use degradation in the Amazon “Arc of Deforestation,” *Theor. Appl. Climatol.*, vol. 125, no. 3-4, pp. 609-623, Aug. 2016. https://doi.org/10.1007/s00704-015-1516-9

[13] L. Durieux, L. A. Toledo Machado, and H. Laurent, “The impact of deforestation on cloud cover over the Amazon arc of deforestation,” *Remote Sens. Environ.*, vol. 86, no. 1, pp. 132-140, Jun. 2003. https://doi.org/10.1016/S0034-4257(03)00095-6

[14] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), “Central and South America,” in *Climate Change 2022 – Impacts, Adaptation and Vulnerability: Working Group II Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2022, pp. 1689-1816. https://doi.org/10.1017/9781009325844.014

[15] Y. H. Kim, S. K. Min, X. Zhang, J. Sillmann, and M. Sandstad, “Evaluation of the CMIP6 multi-model ensemble for climate extreme indices,” *Weather Clim. Extrem.*, vol. 29, p. 100269, Sep. 2020.

https://doi.org/10.1016/j.wace.2020.100269
[16] W. Li, Z. Jiang, X. Zhang, and L. Li, "On the Emergence of Anthropogenic Signal in Extreme Precipitation Change Over China," *Geophys. Res. Lett.*, vol. 45, no. 17, pp. 9179-9185, Sep. 2018. https://doi.org/10.1029/2018GL079133
[17] J. D. Giraldo-Osorio, D. E. Trujillo-Osorio, and O. M. Baez-Villanueva, "Analysis of ENSO-Driven Variability, and Long-Term Changes, of Extreme Precipitation Indices in Colombia, Using the Satellite Rainfall Estimates CHIRPS," *Water*, vol. 14, no. 11, p. 1733, Jun. 2022. https://doi.org/10.3390/w14111733
[18] H. D. Salas, G. Poveda, Ó. J. Mesa, and N. Marwan, "Generalized synchronization between ENSO and hydrological variables in Colombia: A recurrence quantification approach," *Front. Appl. Math. Stat.*, vol. 6, p. 3, Mar. 2020. https://doi.org/10.3389/fams.2020.00003
[19] J. C. Espinoza *et al.*, "Hydroclimate of the Andes Part I: Main Climatic Features," *Front. Earth Sci.*, vol. 8, no. 54, Mar. 2020. https://doi.org/10.3389/feart.2020.00064
[20] G. Poveda, "La hidroclimatología de Colombia: Una Síntesis desde la escala Inter-Decadal hasta la escala Diurna," *Rev. Acad. Colomb. Cienc.*, vol. 28, no. 107, pp. 201-222, Jun. 2004. https://doi.org/10.18257/raccefyn.28(107).2004.1991
[21] G. Poveda, D. M. Álvarez, and O. A. Rueda, "Hydro-climatic variability over the Andes of Colombia associated with ENSO: A review of climatic processes and their impact on one of the Earth's most important biodiversity hotspots," *Clim. Dyn.*, vol. 36, no. 11, pp. 2233-2249, Jun. 2011. https://doi.org/10.1007/s00382-010-0931-y
[22] P. A. Arias, G. Ortega, L. D. Villegas, and J. A. Martínez, "La climatología colombiana en modelos CMIP5/CMIP6: Sesgos persistentes y mejoras," *Rev. Fac. Ing. Univ. Antioquia*, no. 100, pp. 75-96, May. 2021. https://doi.org/10.17533/udea.redin.20210525
[23] G. Poveda, J. C. Espinoza, M. D. Zuluaga, S. A. Solman, R. Garreaud, and P. J. van Oevelen, "High Impact Weather Events in the Andes," *Front. Earth Sci.*, vol. 8, May. 2020. https://doi.org/10.3389/feart.2020.00162
[24] J. D. Pabón Caicedo, "Cambio climático en Colombia: Tendencias en la segunda mitad del siglo XX y escenarios posibles para el siglo XXI," *Rev. Acad. Colomb. Cien.*, vol. 36, no. 139, pp. 261-278, Jun. 2012. https://raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/2462/3860
[25] M. Vuille, R. S. Bradley, M. Werner, and F. Keimig, "20th century climate change in the tropical Andes: Observations and model results," *Climatic Change*, vol. 59, no. 1, pp. 75-99, Jul. 2003. https://doi.org/10.1023/A:1024406427519
[26] A. F. Hurtado Montoya, and Ó. J. Mesa Sánchez, "Cambio climático y variabilidad espacio–temporal de la precipitación en Colombia," *Rev. EIA*, vol. 12, no. 24, pp. 131-150, Jul.-Dec. 2015. https://www.redalyc.org/pdf/1492/149244222008.pdf
[27] A. M. Carmona, and G. Poveda, "Detección de tendencias de largo plazo en series hidroclimáticas mensuales de Colombia mediante descomposición modal empírica," *Climat. Change*, vol. 123, pp. 301-313, Mar. 2014. https://doi.org/10.1007/s10584-013-1046-3
[28] E. M. Fischer, and R. Knutti, "Anthropogenic contribution to global occurrence of heavy-precipitation and high-temperature extremes," *Nature Clim. Change*, vol. 5, no. 6, pp. 560-564, Jun. 2015. https://doi.org/10.1038/nclimate2617
[29] C. Deser, A. S. Phillips, V. Bourdette, and H. Teng, "Uncertainty in climate change projections: the role of internal variability," *Clim. Dyn.*, vol. 38, pp. 527-546, Feb. 2012. https://doi.org/10.1007/s00382-010-0977-x
[30] Coalición para la Alimentación y el Uso del Suel, "Anexo Subregiones de Antioquia: Diversidad y oportunidad," FOLU Colombia, Colombia, 2022. Accessed: Jul. 20, 2025. [Online]. Available: https://folucolombia.org/wp-content/uploads/2022/03/Subregiones-FOLU-Antioquia.pdf
[31] Universidad de Antioquia, Consejo Territorial de Planeación de Antioquia, and Gobernación de Antioquia, "Subregión Nordeste Antioqueño: Perfil de Desarrollo Subregional, Antioquia," Colombia, 2023. Accessed: Jul. 20, 2025. [Online]. Available: https://ctpantioquia.co/wp-content/uploads/2023/12/Perfil-de-desarrollo-Nordeste_compressed-11.pdf
[32] Cámara de Comercio de Medellín para Antioquia, "Perfil socioeconómico de la subregión Nordeste," CCMA, Medellín, Colombia, 2019. Accessed: Jul. 20, 2025. [Online]. Available: https://biblioteca.camaramedellin.com.co/DesktopModules/EasyDNNNews/DocumentDownload.ashx?portalid=0&moduleid=459&articleid=6021&documentid=279

[33] U. J. Villa Ramírez, "Correspondencia entre competencias laborales y competencias esenciales en salud pública del médico veterinario, el psicólogo y el gerente en sistemas de información en salud en los equipos de salud pública de los municipios de las subregiones Nordeste y Magdalena Medio, Antioquia 2017," Tesis de Maestría, Universidad Autónoma de Manizales, Manizales, Colombia, 2018. https://repositorio.autonoma.edu.co/handle/11182/710

[34] L. J. Bernal-Guzmán, "Minería de oro en el Nordeste antioqueño: una disputa territorial por el desarrollo," *Gest. Amb.*, vol. 21, no. 2, pp. 74-85, Dec. 2018. https://doi.org/10.15446/ga.v21n2supl.77865

[35] J. Rochlin, "Obstacles to mining formalization in Colombia," *Resour. Policy*, vol. 73, p. 102135, Oct. 2021. https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2021.102135

[36] A. González-González, N. Clerici, and B. Quesada, "Growing mining contribution to Colombian deforestation," *Environ. Res. Lett.*, vol. 16, no. 6, Jun. 2021. https://doi.org/10.1088/1748-9326/abfcf8

[37] IDEAM, "Consulta y Descarga de Datos Hidrometeorológicos," ideam.gov. Accessed: Jul. 20, 2025. [Online]. Available: http://dhime.ideam.gov.co/atencionciudadano/

[38] IDEAM, "Galería de mapas – Datos abiertos," ideam.gov. Accessed: Jul. 20, 2025. [Online]. Available https://visualizador.ideam.gov.co/CatalogoObjetos/geo-open-data?theme=&group=

[39] ETCCDI Climate Change Indices, "Climate Change Indices Definitions," pacificclimate.org. Accessed: Jul. 20, 2025. [Online]. Available: https://etccdi.pacificclimate.org/indices_def.shtml

[40] World Climate Research Program-WCRP, "Expert Team on Climate Change Detection and Indices (ETCCDI)," climate.org. Accessed: Jul. 20, 2025. [Online]. Available: https://www.wcrp-climate.org/etccdi

[41] MET eireann The Irish Meteorological Service, "Climate Change Indices (ETCCDI)," met.ie. Accessed: Jul. 20, 2025. [Online]. Available: https://www.met.ie/climate/climate-change-indices-etccdi

[42] H. Yin, and Y. Sun, "Characteristics of extreme temperature and precipitation in China in 2017 based on ETCCDI indices," *Adv. Clim. Chang. Res.*, vol. 9, no. 4, pp. 218-226, Dec. 2018. https://doi.org/10.1016/j.accre.2019.01.001

[43] ETCCDI Climate Change Indices, "Climate Change Indices Background," pacificclimate.org. Accessed: Jul. 20, 2025. [Online]. Available: http://etccdi.pacificclimate.org/indices.shtml

[44] K. H. Hamed, "Exact distribution of the Mann-Kendall trend test statistic for persistent data," *J. Hydrol*., vol. 365, no. 1-2, pp. 86-94, Feb. 2009. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2008.11.024

[45] K. H. Hamed, and A. Ramachandra Rao, "Hydrology A modified Mann-Kendall trend test for autocorrelated data," *J. Hydrol.*, vol. 204, no. 1-4, pp. 182-196, Jan. 1998. https://doi.org/10.1016/S0022-1694(97)00125-X

[46] G. Galindo, O. J. Espejo, J. C. Rubiano, L. K. Vergara, and E. Cabrera, *Protocolo de procesamiento digital de imagenes para la cuantificación de la deforestación de Colombia V.2*, Bogotá, Col: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM, 2014. https://www.ideam.gov.co/sites/default/files/archivos/protocolo_de_pdi_para_la_cuantificacion_de_la_deforestacion_en_colombia_v2_1.pdf

[47] Esri, "ArcGIS Online. Con tecnología de Esri," arcgis.com. 2023. Accessed: Jul. 20, 2025. [Online]. Available: https://www.arcgis.com/

[48] H. J. Fowler *et al.*, "Anthropogenic intensification of short-duration rainfall extremes," *Nat. Rev. Earth Environ*., vol. 2, no. 2. pp. 107-122, Feb. 2021. https://doi.org/10.1038/s43017-020-00128-6

[49] P. Singh, R. Pratap Singh, and V. Srivastava, *Contemporary environmental issues and challenges in era of climate change*, Singapore, SG: Springer Singapore, 2019. https://doi.org/10.1007/978-981-32-9595-7

[50] C. Lesk *et al.*, "Compound heat and moisture extreme impacts on global crop yields under climate change," *Nat. Rev. Earth Environ.*, vol. 3, no. 12, pp. 872-889, Dec. 2022. https://doi.org/10.1038/s43017-022-00368-8

[51] C. Faurie, B. M. Varghese, J. Liu, and P. Bi, "Association between high temperature and heatwaves with heat-related illnesses: A systematic review and meta-analysis," *Sci. Total Environ.*, vol. 852, p. 158332, Dec. 2022. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.158332

[52] W. Matsee, S. Charoensakulchai, and A. N. Khatib, "Heat-related illnesses are an increasing threat for travellers to hot climate destinations," *J. Travel Med*., vol. 30, no. 4, May. 2023. https://doi.org/10.1093/jtm/taad072

[53] Naciones Unidas, Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), and Unión Europea, "El cambio climático y sus efectos en la biodiversidad de América Latina síntesis de políticas públicas sobre cambio climático," Santiago, 2017. Accessed: Jul. 20, 2025. [Online]. Available: https://www.cepal.org/sites/default/files/news/files/sintesis_pp_cc_cc_y_sus_efectos_en_la_biodiversidad.pdf

[54] G. M. Hill, A. Y. Kawahara, J. C. Daniels, C. C. Bateman, and B. R. Scheffers, "Climate change effects on animal ecology: butterflies and moths as a case study," *Biol. Rev.*, vol. 96, no. 5, pp. 2113-2126, Oct. 2021. https://doi.org/10.1111/brv.12746

[55] L. Zhou, R. E. Dickinson, A. Dai, and P. Dirmeyer, "Detection and attribution of anthropogenic forcing to diurnal temperature range changes from 1950 to 1999: Comparing multi-model simulations with observations," *Clim. Dyn.*, vol. 35, no. 7, pp. 1289-1307, Dec. 2010. https://doi.org/10.1007/s00382-009-0644-2

[56] J. A. Marengo *et al.*, "Drought in Northeast Brazil: A review of agricultural and policy adaptation options for food security," *Climate Resil. Sustain.*, vol. 1, no. 1, p. e17, Feb. 2022. https://doi.org/10.1002/cli2.17

[57] S. B. Bedeke, "Climate change vulnerability and adaptation of crop producers in sub-Saharan Africa: a review on concepts, approaches and methods," *Environ. Dev. Sustain.*, vol. 25, no. 3, pp. 1-35, Feb. 2023. https://doi.org/10.1007/s10668-022-02118-8

[58] C. A. Córdoba Vargas, S. Hortúa Romero, and T. León-Sicard, "Resilience to climate variability: the role of perceptions and traditional knowledge in the Colombian Andes," *Agroecol. Sustain. Food Syst.*, vol. 44, no. 4, pp. 419-445, Apr. 2020. https://doi.org/10.1080/21683565.2019.1649782

[59] B. Abidoye, "Economics of Climate Change Adaptation," *Oxford Research Encyclopedia of Environmental Science*, Oxford University Press, May. 2021. https://doi.org/10.1093/acrefore/9780199389414.013.579

[60] K. Hayhoe *et al.*, "Regional climate change projections for the Northeast USA," *Mitig. Adapt. Strateg. Glob. Chang.*, vol. 13, no. 5-6, pp. 425-436, Jun. 2008. https://doi.org/10.1007/s11027-007-9133-2

[61] P. Longobardi, A. Montenegro, H. Beltrami, and M. Eby, "Deforestation induced climate change: Effects of spatial scale," *PLoS One*, vol. 11, no. 4, p. e0153357, Apr. 2016. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0153357

[62] J. Moussa Kourouma, D. Phiri, A. T. Hudak, and S. Syampungani, "Land use/cover spatiotemporal dynamics and implications on environmental and bioclimatic factors in Chingola district, Zambia," *Geomat. Nat. Hazards Risk*, vol. 13, no. 1, pp. 1898-1942, Aug. 2022. https://doi.org/10.1080/19475705.2022.2097132

[63] J. A. King, J. Weber, P. Lawrence, S. Roe, A. L. S. Swann, and M. Val Martin, "Global and regional hydrological impacts of global forest expansion," *Biogeosciences*, vol. 21, no. 17, pp. 3883-3902, Sep. 2024. https://doi.org/10.5194/bg-21-3883-2024

[64] A. H. M. Oliveira *et al.*, "Assessing Forest Degradation Through Remote Sensing in the Brazilian Amazon: Implications and Perspectives for Sustainable Forest Management," *Remote Sens.*, vol. 16, no. 23, p. 4557, Dec. 2024. https://doi.org/10.3390/rs16234557

[65] C. Sur, V. Kumar Verma, P. Panwar, G. Shukla, S. Chakravarty, and A. J. Nath, "Multiscale and multitemporal assessment of vegetation degradation using remote sensing in tropical regions," *Front. For. Glob. Change*, vol. 7, p. 1382557, Jun. 2024. https://doi.org/10.3389/ffgc.2024.1382557

[66] Y. He *et al.*, "Remote sensing of tropical forest disturbances: Advances, challenges and climate interactions," *Front. Remote Sens.*, vol. 5, p. 1332728, Mar. 2024. https://doi.org/10.3389/frsen.2024.1332728

[67] L. Castillón, P. Rau, L. Bourrel, and F. Frappart, "Multiscale interpretation of vegetation cover change and climate interactions using satellite observations," *Front. Remote Sens.*, vol. 6, p. 1529044, May. 2025. https://doi.org/10.3389/frsen.2025.1529044

[68] J. Krishnaswamy, R. John, and S. Joseph, "Consistent response of vegetation dynamics to recent climate change in tropical mountain regions," *Glob. Chang. Biol.*, vol. 20, no. 1, pp. 203–215, Aug. 2014. https://doi.org/10.1111/gcb.12362

[69] Q. Lejeune, E. L. Davin, B. P. Guillod, and S. I. Seneviratne, 'Influence of Amazonian deforestation on the future evolution of regional surface fluxes, circulation, surface temperature and precipitation', *Clim. Dyn.*, vol. 44, no. 9-10, pp. 2769-2786, May. 2015. https://doi.org/10.1007/s00382-014-2203-8

[70] M. Escalante Ramírez, and D. C. Gómez Cano, "Revisión evaluativa del plan integral de cambio climático de Antioquia en la sublínea de procesos de restauración," Tesis de especialización, Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín, Colombia, 2023. http://hdl.handle.net/20.500.11912/10874

[71] IDEAM, "Resultados Monitoreo de la Deforestación 2018," ideam.gov. Accessed: Jun. 20, 2025. [Online]. Available: http://www.ideam.gov.co/documents/24277/91213793/Deforestaci%C3%B3n/6a0a48b5-b5cb-4683-823a-3352be9b2700

[72] L. Shen, J. Wen, Y. Zhang, S. Ullah, J. Cheng, and X. Meng, "Changes in population exposure to extreme precipitation in the Yangtze River Delta, China," *Clim. Serv.*, vol. 27, p. 100317, Aug. 2022. https://doi.org/10.1016/j.cliser.2022.100317

[73] M. Ombadi, M. D. Risser, and A. M. Rhoades, "A warming-induced reduction in snow fraction amplifies rainfall extremes," *Nature*, vol. 619, pp. 305-310, Jul. 2023. https://doi.org/10.1038/s41586-023-06092-7

[74] K. E. Trenberth, A. Dai, R. M. Rasmussen, and D. B. Parsons, "The changing character of precipitation," *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, vol. 84, pp. 1205-1218, Sep. 2003. https://doi.org/10.1175/BAMS-84-9-1205

[75] S. Westra, L. V. Alexander, and F. W. Zwiers, "Global increasing trends in annual maximum daily precipitation," *J. Climate*, vol. 26, no. 11, pp. 3904-3918, Jun. 2013. https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00502.1

[76] L. Gimeno *et al.*, "Extreme precipitation events," *Wires Water*, vol. 9, no. 6, p. e1611, Nov. 2022. https://doi.org/10.1002/wat2.1611

CONFLICTO DE INTERÉS

Los autores manifiestan que no existe ningún conflicto de interés, ya sea financiero, profesional o personal, que pudiera surgir de la publicación del presente artículo.

CONTRIBUCIÓN DE AUTORÍA

Lilia María Marín Zapata: conceptualización, procesamiento de los datos, escritura, edición y análisis de resultados.

Alejandro Builes-Jaramillo: conceptualización, análisis de resultados, escritura y edición.

Hernán D. Salas: conceptualización, procesamiento de los datos, análisis de resultados, escritura y edición.

Carlos Arturo Hoyos Restrepo: procesamiento y análisis de la información geoespacial.