

Cambio climático y variabilidad espacio-temporal (serie 1980-2020) de la temperatura en Tolima, Colombia

Climate change and spatiotemporal variability of temperature (1980-2020 series) in Tolima, Colombia

Yenny Fernanda Urrego Pereira^{1,2}, Jairo García Lozano^{1,3}, Jhon Jairo Vega Díaz^{1,4},
Alexa Valentina Rodríguez Valencia^{1,5}, Nataly Quesada Ortiz^{1,6}.

¹Universidad del Tolima. Sede central. Ibagué, Tolima, Colombia. ²✉ yfurregop@ut.edu.co; ³✉ jgarcialo@ut.edu.co;
⁴✉ jjvega@ut.edu.co; ⁵✉ avrodriguezval@ut.edu.co; ⁶✉ nquesadao@ut.edu.co



<https://doi.org/10.15446/acag.v72n1.109207>

2023 | 72-1 p 7-15 | ISSN 0120-2812 | e-ISSN 2323-0118 | Rec.: 2023-05-29 Acep.: 2023-07-18

Resumen

El cambio climático es uno de los mayores desafíos que enfrenta la humanidad y desde ahora se deben tomar acciones para disminuir sus impactos sobre el medio natural, los sistemas agrícolas y la vida futura en el planeta. En la presente investigación se analizó la variación espacio-temporal de la temperatura del aire en el Tolima, Colombia, con el fin de detectar tendencias que evidencien cambio climático y modificaciones en la clasificación climática de Köppen en el departamento. En este trabajo se utilizó una base de datos climatológica integrada por 37 estaciones gestionadas por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). La base de datos se dividió en dos series de tiempo: (1980-1999) y (2000-2020) y se analizó la temperatura, considerando épocas secas y lluviosas y las fases Niño-Niña-Neutro del fenómeno ENSO, con el propósito de identificar patrones de diferencia en la temperatura y clasificación climática entre las series de tiempo. Luego, las tasas de aumento de la temperatura del aire identificadas en zonas particulares del Tolima fueron utilizadas para la construcción de modelos de estimación de la temperatura para los próximos 20 años. El análisis mostró que el 55 % de las estaciones presentan tendencia de aumento de la temperatura, y para los próximos 20 años se proyecta un aumento de la temperatura entre 0.08 °C y 3.25 °C. Este aumento sería más acelerado e intenso que lo previsto por el IDEAM, para el peor escenario se daría un forzamiento radiactivo de 8 W m⁻² día⁻¹. Por otra parte, la clasificación de Köppen no cambió para las dos series de tiempo 1980-99 y 2000-20, y tampoco para la serie proyectada 2020-40. Sin embargo, el incremento de la temperatura observado y proyectado sugiere aumento de las tasas de evaporación que podrían aumentar la vulnerabilidad a sequías e incendios forestales en el Tolima.

Palabras claves: clasificación climática de Köppen, cambio climático, variabilidad climática.

Abstract

Climate change is one of the greatest challenges facing humanity and from now, on actions must be taken to reduce its impacts on the natural environment, agricultural systems and future life on the planet. In the present investigation, the spatiotemporal variation of the air temperature in Tolima was analysed in order to detect trends that show climate change and modifications in the Köppen climate classification in the department. In this work, a climatological database made up of 37 stations managed by the Institute of Hydrology, Meteorology and Environmental Studies IDEAM was used. The database was divided into two time series, one from 1980 to 1999 and the other from 2000 to 2020, and the temperature was analyzed, considering dry and rainy seasons and the Niño-Niña-Neutral phases of the ENSO phenomenon, with the purpose of identifying difference patterns in the temperature and climatic classification between the time series. Then, the air temperature increase rates identified at areas of Tolima were used to build temperature estimation models for the next 20 years. The analysis showed that 55 % of the stations presented a trend of increasing temperatures and for the next 20 years, a temperature increase between 0.08 °C and 3.25 °C is projected. This increase would be faster and more intense than those predicted by IDEAM, having the worst scenario with a radiative forcing of 8 W m⁻² day⁻¹. On the other hand, the Köppen classification did not change for both time series, 1980-99 and 2000-20, and neither for the projected 2020-40 series. However, the observed and projected increase in air temperature suggests a raise in evaporation rates that could increase vulnerability to droughts and forest fires in Tolima.

Key words: Köppen climate classification, climate variability, climate change.

Introducción

A nivel global, los diferentes estratos climáticos imponen restricciones generalizadas que dan forma a las reservas de especies adaptadas a climas particulares, por ende, se puede decir que las condiciones abióticas son determinantes para la distribución y diversidad de las especies del planeta (Calatayud *et al.*, 2021). Por lo tanto, el clima rige la base de la vida en la Tierra y puede cambiar a lo largo del tiempo. Cualquier cambio a largo plazo en la condición climática existente durante un largo periodo se denomina cambio climático y se atribuye principalmente al efecto de los gases de efecto invernadero (GEI) antropogénicos sobre la temperatura del aire o la variabilidad natural; estos cambios pueden afectar la vida presente y futura del planeta (Rahimi *et al.*, 2020; Useros Fernández, 2013).

En la Figura 1 se puede apreciar una representación del aumento de la temperatura del aire debido al cambio climático, el cual es profundizado por actividades humanas, por lo cual es importante sustituir los estereotipos de estilos de vida y explotación de los recursos naturales que las personas tienen actualmente, para que no se afecte de manera tan drástica el futuro inmediato. El cambio climático pone en riesgo condiciones básicas de bienestar para las generaciones actuales y futuras del planeta; ello se puede notar en los nuevos regímenes de sequías y lluvias que se presentan y que afectan los recursos públicos, así como la base social y económica de los países (Yepes Mayorga, 2012). En el caso de Latinoamérica, se pronostica una posible extinción de las especies de la sabana central brasilera (sabanización) y la pérdida de las especies forestales y de biodiversidad de la Amazonía, así como el declive de la productividad de los ecosistemas. Se prevé, también, la desaparición de glaciares tropicales de latitudes medias y una disminución general de la disponibilidad de hídrica (Magrin *et al.*, 2007). Actualmente se puede apreciar una menor duración

de la temporada de lluvias, eventos muy intensos alternados con falta de precipitación, aumento del frío nocturno y del calor durante el día en las tierras altas (heladas), lo cual pone en riesgo la seguridad alimentaria del planeta (PNUD, 2009).

El quinto informe del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC - AR5) declaró que la temperatura media del aire en la superficie sobre las áreas terrestres ha aumentado aproximadamente 0.85 °C desde 1880 y las últimas 3 décadas en el hemisferio norte fueron las más cálidas (Rahimi *et al.*, 2020). En el sexto informe, el aumento global fue de 1.1 °C; este incremento no tiene precedentes en la historia humana reciente. Las olas de calor, que suelen ocurrir cada 10 años, podrían ocurrir cada 2.5 años con un aumento de la temperatura global de 1.5 °C. A su vez, existe una probabilidad mayor del 50 % de que ese aumento se alcance antes del 2040, con lo cual los efectos como el deshielo del permafrost, la destrucción masiva de los bosques, el aumento del nivel del mar, la pérdida de biodiversidad, la sequía y la hambruna, entre otros, serían impactos devastadores para la vida y actividades antrópicas en el planeta (IPCC, 2022). Dado que Colombia no es ajena a este reto mundial, es inexorable alcanzar conocimientos a fines, para que de esta forma se puedan implementar acciones de mitigación y adaptación.

Por este motivo, en el presente trabajo se aplicó la clasificación climática de Köppen, a partir de una base de datos de 37 estaciones climáticas, con una serie temporal 1980-2020, con el fin de conocer la variabilidad climática del Tolima y estructurar bases que permitan detectar cambios significativos en el comportamiento de la temperatura asociados a los impactos del cambio climático.

La metodología establecida por Köppen considera la variación interanual de la temperatura y la precipitación para establecer si el clima es A (tropical), B (seco), C (húmedo subtropical), D

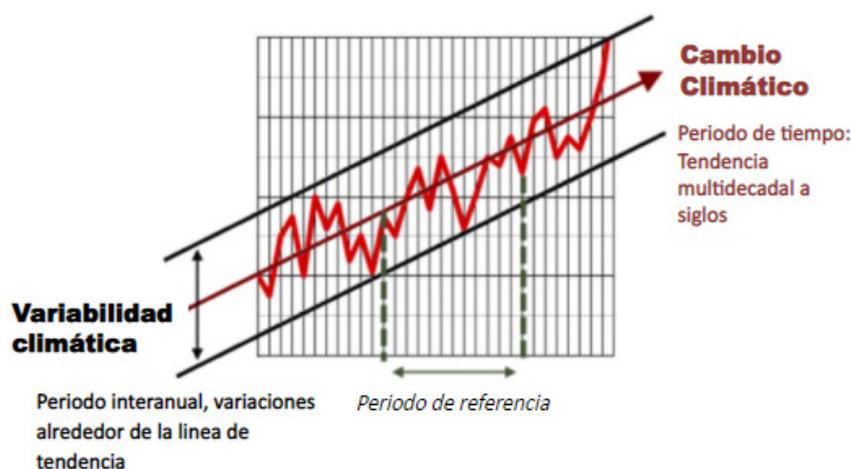


Figura 1. Tendencia de aumento de la temperatura del aire en un periodo multidecadal.
Fuente: (García *et al.*, 2012)

(continental) o E (polar) y cómo es su condición de humedad según las condiciones latitudinales y altitudinales. La clasificación de Köppen tiene más de un siglo de antigüedad y se ha aplicado en estudios meteorológicos, bioclimatológicos y agroclimáticos para la gestión sustentable de los recursos medioambientales (Álvarez *et al.*, 2013)..

Las tasas de aumento de la temperatura permitieron proyectar una estimación de la clasificación climática para los próximos 20 años. Por lo tanto, este estudio permitirá identificar a nivel local posibles zonas vulnerables a sequías e incendios en el Tolima.

Materiales y métodos

El estudio se realizó en el departamento del Tolima, situado en el centro de Colombia, entre los 02°52'59" y 05°19'59" latitud Norte, y los 74°24'18" y 76°06'23" longitud Oeste. El Tolima cuenta con una superficie de 23 582 km², equivalentes al 2.1 % del territorio nacional y posee 3 grandes regiones climáticas: una zona semihúmeda localizada en la parte alta de las cordilleras Central y Oriental, con precipitaciones superiores a 2000 mm anuales; una zona ligeramente húmeda, con un rango de 1500 a 2000 mm anuales; y la zona subhúmeda del valle del río Magdalena, con un rango de 1000 a 1500 mm anuales y temperaturas medias anuales superiores a 24 °C (CORTOLIMA, 2007).

Análisis de la información climática

Los datos provenientes del IDEAM se recibieron como ficheros de texto (archivos en extensión .txt) y se usaron para construir una base de datos en Excel con registros desde el año 1980 hasta el 2020, provenientes de 37 estaciones de referencia y mecánicas que contenían termómetros instalados siguiendo lo establecido en Allen *et al.* (2006) para registrar valores diarios de temperatura del aire. Los datos provenían de observaciones instrumentales con psicrómetros (termómetro seco para temperatura media), termómetros de mercurio para la temperatura máxima y termómetros de alcohol para la temperatura mínima. La red de estaciones comprendía zonas desde 205 hasta los 2990 m s. n. m, según el IDEAM (2023). La base de datos se dividió en 2 series de datos, 1980-1999 y 2000-2020; en cada serie y estación se realizaron gráficos de temperatura vs. diferentes periodos, primero por épocas secas y lluviosas, y después, por los periodos de El Niño y La Niña para visualizar posibles tendencias de incremento de la temperatura.

En cada serie y estación se realizó un proceso de complementación de datos faltantes que consiste en identificar los *outliers* o datos anómalos y aplicar análisis de tendencias y pruebas de homogeneidad para detectar errores sistemáticos en la información y corregirlos previamente al análisis

del comportamiento de la temperatura. Luego, se procedió a la fase de rellenado de *gaps* o datos vacíos para datos diarios. En este trabajo se utilizó el método de correlación lineal para el rellenado de *gaps*. Finalmente, se aplicó la metodología empleada en González-Rouco *et al.* (2001) para el proceso de llenar la información faltante.

Posteriormente se realizó un análisis de tendencia de la temperatura en la serie de tiempo continuo desde 1980 hasta 2020, con el método Mann-Kendall (Irwandi, Rosid y Mart 2023; Shigute *et al.*, 2023) y usando el nivel de programación de Python, con la librería *pymannkendall* (Hussain y Mahmud, 2019). La implementación en Python tomó los datos en archivos csv, con columnas como: fecha, época (seca o lluvia), periodo (Niño o Niña) en cada estación estudiada. Esta tabla se llevó a un *dataframe* con la librería *Pandas*, y por medio de un ciclo se iteró en cada estación, aplicando el test Yue and Wang Modified MK a la serie de cada estación con todos los datos, y esta serie fue filtrada por: épocas secas, épocas lluviosas, periodos de El Niño y periodos de La Niña. De esta estimación se extrajo la interpretación de la tendencia, que partió desde la probabilidad *p* como medida de certeza del modelo, en la cual, si *p* es inferior a 0.5, se acepta que hay tendencia en la serie. También se estableció el parámetro Tau que permite saber si la tendencia es a incrementar o disminuir los valores, según el resultado Tau como positivo o negativo, respectivamente. Los resultados de cada estación se guardaron en una lista, la cual se fue concatenando hasta obtener una tabla resumen que permitió verificar lo detectado.

Determinación de la clasificación climática del Tolima

Para determinar la clasificación climática del Tolima se aplicó el método de Köppen descrito en Álvarez *et al.* (2013), en las dos series de tiempo: una del año 1980 a 1999, y la otra, del año 2000 al 2020, con el fin de establecer si la clasificación climática podría cambiar debido a los aumentos progresivos de la temperatura en el departamento a causa del cambio climático.

Generación de escenarios de cambio climático para el Tolima

Primero, se realizaron gráficas de la temperatura media del aire (eje Y) frente al tiempo (eje X) para cada uno de los periodos analizados (1980-1999 y 2000-2020). Luego, se determinó visualmente la presencia de 2 comportamientos, denominados Tipo A y Tipo B. El Tipo A se asignó cuando la oscilación de las temperaturas en función del tiempo no mostraba incrementos o descensos de mediano plazo; y el Tipo B cuando se presentaba incremento o descenso progresivo de la temperatura del aire en función de la escala de tiempo disponible, tal como se presenta

en la Figura 1. Así, la variabilidad climática se detectó mediante la categorización de cada estación como tipo A o B, dentro de las cuales las estaciones Tipo B fueron evidencia de variabilidad climática. De esta manera, las ecuaciones obtenidas de las regresiones producto de las estaciones Tipo B permitieron proyectar a pequeña escala el cambio de temperatura para los próximos 20 años.

Los aumentos de temperatura simulados se contrastaron con los escenarios establecidos por el IPCC en su sexto informe de evaluación (AR6) y los resultados publicados en IDEAM *et al.* (2015) que contemplan aumentos de 4.9 °C, 3 °C, 2.4 °C y 1.5 °C, y que van del peor a mejor escenario con un periodo de estabilización en el año 2100.

Resultados

Comportamiento de la temperatura del aire en épocas secas y lluviosas y en fases Niño-Niña-Neutro en el Tolima

En la Tabla 1 se aprecia que en el 57 % del área estudiada se presenta incremento y en el 10 % descenso de la temperatura; en el 33 % del área restante no se observaron tendencias. Las zonas con mayor calentamiento estarían en los municipios cercanos a amplios cuerpos de agua como Saldaña o zonas de media montaña como Cajamarca, tal como se aprecia en la Figura 2. También se encontraron otros municipios con incrementos similares a Cajamarca, como Valle del San Juan, Santa Isabel y la zona alta de Ibagué, con aumentos que oscilaron entre 0.62 y 3.58 °C para las épocas de El Niño y entre 0.19 y 1.92 °C, para las épocas de La Niña. Estos resultados están en concordancia con los registros del IPCC (IDEAM *et al.*, 2015).

Por otra parte, en Saldaña se observó un aumento de hasta 1.8 °C de la temperatura durante periodos de La Niña. Esta generación de calor estaría asociada a las condiciones de mayor nubosidad y humedad relativa. Los resultados de la Tabla 1 coinciden con lo observado en la Tabla 2, en la cual se detectan los comportamientos tipo A y B para las zonas estudiadas. Las estaciones que no presentaron tendencia o comportamiento Tipo A, como Coyaima, Natagaima, Guamo, Mariquita y Ambalema están ubicadas en un rango altitudinal entre los 349 y 500 m s. n. m. y presentan de manera histórica unas temperaturas muy altas, con promedios anuales entre los 26 y 28 °C y temperaturas máximas que alcanzan los 33 °C. En estos casos no se aprecia lo observado en municipios o veredas ubicadas en zonas de pie de monte o de alta montaña, en los cuales el aumento de la temperatura impacta más rápidamente sobre la modificación del microclima de esos lugares.

Los ecosistemas que tienen glaciares y permafrost reaccionan más rápidamente a aumentos de temperatura debido a su relación directa con el punto de descongelamiento; por tal motivo el aumento de la temperatura se relaciona a una tasa más acelerada de cambio e impacto en el entorno. Algunos estudios han registrado calentamiento acelerado en zonas de alta montaña de la cordillera de los Andes, lo cual genera fuertes impactos medioambientales. El Tolima cuenta con territorio en las cordilleras Central y Oriental colombiana, por lo tanto, estas zonas de alta montaña en páramos y nevados podrían presentar tasas de cambio más aceleradas (Anderson *et al.*, 2011).

Tabla 1. Test de Mann-Kendall

Municipio	Tendencia	Probabilidad	Valor Tau
Saldaña	Incremento	0.002	0.094
Natagaima	Sin tendencia	0.265	0.017
Coyaima	Sin tendencia	0.096	-0.027
Dolores	Sin tendencia	0.772	-0.006
Prado	Incremento	0.038	0.053
Purificación	Incremento	0.04	0.043
Guamo	Incremento	0	0.079
Flandes	Incremento	0	0.1
Valle de San Juan	Incremento	0	0.115
Natagaima - El Espinal	Sin tendencia	0.064	0.037
Melgar	Incremento	0.001	0.135
Chicoral - El Espinal	Sin tendencia	0.106	-0.037
Cajamarca zona media	Incremento	0	0.101
Cajamarca zona alta	Incremento	0	0.323
Ibagué - Opía	Sin tendencia	0.888	0.006
Ibagué - Aeropuerto Perales	Incremento	0	0.081
Ibagué - Diamante	Descenso	0.014	-0.162
Santa Isabel	Incremento	0	0.113
Mariquita	Incremento	0	0.259
Ambalema	Sin tendencia	0.449	-0.018
Armero	Incremento	0	0.075
Santa Isabel	Incremento	0	0.257
Villahermosa	Incremento	0	0.135
Lérida	Incremento	0.004	0.055
Rioblanco	Incremento	0	0.17
Planadas	Sin tendencia	0.051	0.089
Chaparral zona media	Incremento	0	0.134
Chaparral zona alta	Sin tendencia	0.475	0.01
Ataco	Descenso	0	-0.096
San Antonio	Descenso	0.022	-0.058
Rovira	Sin tendencia	0.07	0.039
San Luis	Descenso	0.013	-0.116
San Sebastián de Mariquita	Incremento	0.046	0.042
Honda	Sin tendencia	0.088	-0.025
Albania	Incremento	0	0.14

Fuente: elaboración propia.

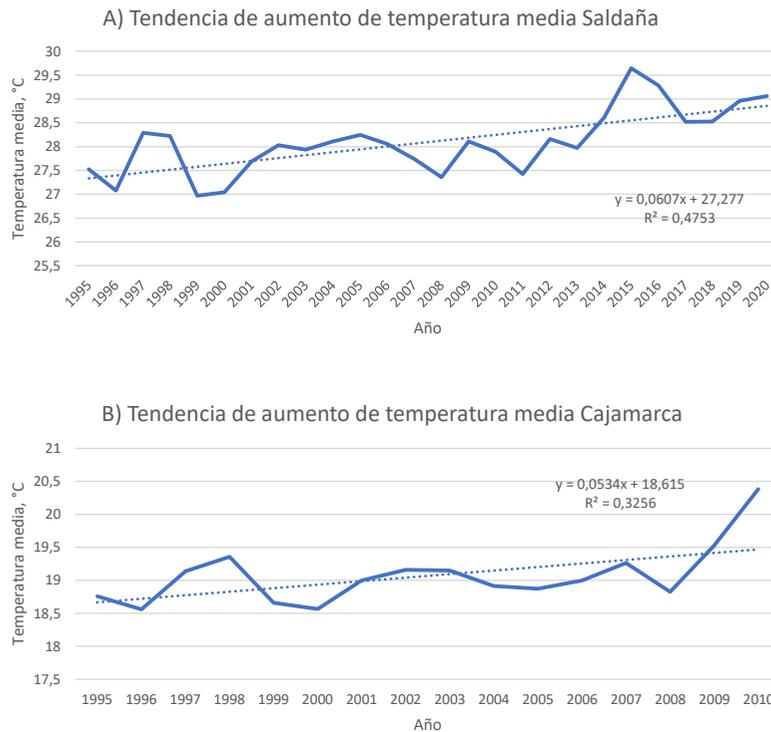


Figura 2. Comportamiento de la temperatura media del aire para los municipios de A) Saldaña (1995-2020) y B) Cajamarca (1983-2010). Fuente: elaboración propia

Para el caso de los municipios que presentan tendencia a incremento o comportamiento Tipo B, se presentó mayor afectación durante épocas secas y lluviosas para periodos de El Niño y La Niña (Tabla 2). Los municipios con mayor tendencia al calentamiento durante épocas secas de periodos de El Niño fueron Saldaña, Prado, Purificación, Valle del San Juan, Melgar, Cajamarca, Ibagué, Santa Isabel, Armero, Lérica (hacia partes altas) y Mariquita (hacia zona Albania); mientras que en los municipios de Flandes, Espinal (hacia Chicoral), Espinal (hacia Natagaima), Cajamarca (parte alta), Lérica (parte baja), Purificación y Honda se identificó que la afectación es mayor durante las épocas lluviosas de periodos de El Niño.

Por otra parte, la zona baja del corredor del Magdalena, entre las cordilleras Central y Oriental del Tolima, presenta municipios de baja altitud respecto al nivel mar y en estos lugares contiguos al río Magdalena se suele experimentar lo que coloquialmente se conoce como *bochorno*, debido a la alta humedad relativa producto de la evaporación diurna de las aguas del río Magdalena. Estos municipios son Prado, Purificación, Saldaña, Lérica (hacia la parte alta), Mariquita, Melgar y Armero. Según los resultados de la Tabla 2 se aprecia que durante periodos de La Niña estos municipios podrían presentar un aumento acelerado en la temperatura (entre 0.58 y 5.27 °C); Saldaña y Purificación serían los lugares posiblemente más afectados. Este aumento de la temperatura se debe, posiblemente, al aumento de

la nubosidad causada por la alta tasa de evaporación de los cuerpos de agua presentes, la cual desencadena un efecto invernadero que incrementa la radiación y, por ende, aumenta la temperatura.

Por otro lado, durante los periodos de El Niño, la mayoría de los municipios podrían presentar un aumento en la temperatura que oscilaría entre 0.06 y 6.98 °C. Sin embargo, este aumento durante periodos de El Niño no es una condición tan frecuente, dado que en los lugares que tienen persistencia de condiciones de “cielo abierto” se generan descensos significativos de la temperatura nocturna. Este enfriamiento nocturno podría generar un descenso en el promedio diario de la temperatura y este efecto, según los resultados, podría estar más presente en Cajamarca y Armero.

En otras palabras, el comportamiento futuro en las zonas bajas del valle del río Magdalena estaría muy influenciado por la nubosidad, debido a que en periodos de La Niña esta nubosidad es más persistente y genera una barrera que impide la salida de la radiación de onda larga al espacio exterior, causando un aumento progresivo de la temperatura; mientras que en periodos de El Niño, al tener cielo abierto o despejado, la radiación de onda larga sale al espacio exterior, lo que genera pérdida de calor o descenso de la temperatura nocturna. Este posible enfriamiento nocturno es similar a lo que actualmente se experimenta en los climas de desierto.

Tabla 2. Aumento de la temperatura del aire T en el Tolima

Localidad	Municipio	m.s.n.m.	Comportamiento diferencial Tipo B		Aumento de T periodos de El Niño		Época con mayor afectación	Aumento de T periodos de La Niña		Época con mayor afectación
			SI	NO	SI	NO		SI	NO	
Jabalcón	Saldaña	425	X		X		Primera seca	X		Segunda seca
Anchique	Natagaima	415		X		X			X	
Media Luna	Coyaima	485		X		X			X	
Pst. de Monta	Prado	349	X		X		Primera seca	X		Segunda lluvia
Lozania	Purificación	400	X		X		Segunda seca	X		Segunda seca
Dolores Hda. Madron	Dolores	1456		X		X			X	
Guamo	Guamo	360		X		X			X	Segunda seca
Valle de San Juan	Valle de San Juan	650	X		X		Primera seca	X		Segunda seca
Apto. Santiago Vila	Flandes	286	X		X		Primera lluvia	X		Segunda seca
Natagaima	Espinal	431	X		X		Primera lluvia		X	
Base Aérea Melgar	Melgar	319	X		X		Segunda seca		X	Primera seca
Chicoral	Espinal	475	X		X		Primera lluvia	X		Segunda seca
Cajamarca	Cajamarca	1920	X		X		Primera seca	X		Segunda lluvia
Hda. Cucuana	Cajamarca	2120	X		X		Segunda lluvia	X		Segunda seca
Perales Hato Opia	Ibagué	750	X		X		Primera lluvia	X		Segunda seca
Apto. Perales	Ibagué	928	X		X		Primera seca	X		Segunda seca
Santa Isabel	Santa Isabel	2250	X		X		Segunda seca	X		Segunda seca
Salto El	Ambalema	450		X		X			X	
Gja. Armero	Armero	300	X		X		Primera seca	X		Segunda seca
Villahermosa	Villahermosa	2029		X		X			X	
La Quinta La	Lérida	500	X		X		Segunda seca	X		Segunda lluvia
Hda. García	Lérida	350	X		X		Primera lluvia	X		Segunda seca
Rosales Fca Los	Planadas	2040		X		X			X	
Apto. Planadas	Planadas	1355		X		X			X	
Gja. Demostración	Chaparral	1040		X		X			X	
El Limón	Chaparral	1000		X		X			X	
Santa Helena	Purificación	300	X		X		Segunda lluvia	X		Segunda lluvia
San Antonio Quinta	San Antonio	1500		X		X			X	
Riomanso	Rovira	2020	X		X			X		Segunda seca
Apto. Mariquita	San Sebastián de Mariquita	475		X		X		X		Segunda lluvia
La Esperanza	Honda	475	X		X		Primera lluvia		X	
Albania	San Sebastián de Mariquita	500	X		X		Segunda seca	X		Segunda seca

Fuente: elaboración propia.

Cambios en la clasificación climática

El análisis climático indicó que el Tolima presenta gran heterogeneidad en su relieve debido al despliegue de la cordillera Central andina, que comprende alturas superiores a 5000 m s. n. m. ubicadas en el Nevado del Tolima. Esta pendiente se desliza en sentido oriente-

occidente hasta alcanzar la cuenca del río Magdalena. Dichas zonas de valle interandino van inclinándose a medida que se acercan a la cordillera Oriental. Por lo tanto, el Tolima presenta diversos pisos térmicos que dan lugar a distintas clasificaciones climáticas (Figura 3).

En este trabajo se aplicó la clasificación de Köppen y, considerando el relieve del Tolima, resultaron climas en categoría A (tropical) y C (templado) siguiendo lo dispuesto en Álvares *et al.* (2013). Para las zonas tropicales de la Figura 3 se encuentran climas en Af (clima ecuatorial), Am (tropical monzónico), Aw (tropical con invierno seco) y As tropical con verano seco; y para las zonas húmedas subtropicales se presentaron clasificaciones en Cf (sin estaciones secas), con divisiones en Cfv (verano cálido) y Cfc (verano frío).

Se puede observar en la Figura 3, para el 2020, que el valle del río Magdalena presenta mayoritariamente clima ecuatorial (Af). En la zona central el clima predominante es el tropical con invierno seco (Aw) y en menor cantidad, se presenta el clima tropical con verano seco (As), en Coyaima y Natagaima. Por otra parte, los climas templados (C), aunque suelen encontrarse en diferentes regiones en los trópicos de Cáncer o Capricornio, se presentan también en el Tolima gracias a la elevación de las cordilleras Central y Oriental. Cabe resaltar que los climas en C son propios de otras latitudes, como lo es el grupo Cfb, que se da entre los 45° y 55° de latitud. Este grupo Cfb es de un clima perteneciente a la costa noroccidental de Noruega o del extremo sur de Chile y Argentina (Navarra, 2022), pero existen en el Tolima gracias a la elevación de las cordilleras.

Ahora bien, los aumentos de temperatura hallados en este estudio fueron aplicados para calcular nuevamente la clasificación climática de Köppen en una serie de tiempo futura 2020-2040; se encontró

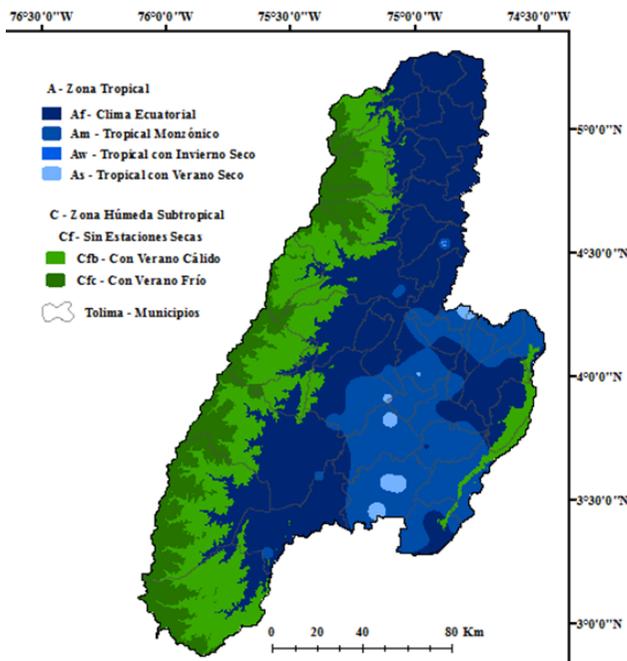


Figura 3. Mapa de la clasificación climática de Köppen para el departamento del Tolima, serie de tiempo 1981- 2020. Fuente: elaboración propia.

que las clasificaciones no cambian y se mantendría la clasificación actual (Tabla 3). Sin embargo, esta clasificación podría cambiar si se le agrega un estudio prospectivo que contemple los posibles cambios en la precipitación.

Existe una altísima variabilidad en el ciclo diurno de la precipitación en los Andes de Colombia (Poveda, 2004), la cual afecta los biomas y la distribución de las plantas (Tovar *et al* 2022), es decir, se presentan tanto periodos largos y secos como periodos breves de intensa precipitación. Esto coincide con las tendencias positivas y negativas en las series de precipitación evaluadas por Ochoa y Poveda (2004). También, según estudios previos realizados por Pérez *et al.* (1998), se han identificado desplazamientos de las épocas lluviosas durante el año. Este desplazamiento, podría generar cambios en la clasificación climática en el Tolima y aumentar las zonas con climas tipo Aw tropical monzónico, As tropical con verano seco, y también las zonas en C podrían cambiar a clasificaciones más cálidas, pero lluviosas.

Discusión

Según Pabón *et al.* (2001), en la depresión del medio y bajo Magdalena las temperaturas medias anuales son generalmente mayores de 27 °C. Como se puede observar, los aumentos de temperatura proyectados en este estudio para los próximos 20 años en el Tolima son mucho mayores y acelerados que los resultados que ha publicado el IDEAM en su última comunicación de *Escenarios de cambio climático* y que los propuestos por (IDEAM y UNAL, 2018) en su estudio de *Variabilidad climática y cambio climático en Colombia* para el año 2018. Mientras que el IDEAM informa que los posibles aumentos de temperatura al año 2050 podrían alcanzar los 2 °C y considera

Tabla 3. Clasificación climática de Köppen para el Tolima, serie de tiempo 1981- 2020 vs. proyección 2020-2040

Municipio	Altura (m s. n. m.)	Köppen 2020	Köppen 2040
Santa Isabel	2250	Cfb	Cfb
Cajamarca	2120	Cfb	Cfb
Ibagué	928	Af	Af
Mariquita	500	Af	Af
Valle de San Juan	650	Am	Am
Lérida	500	Am	Am
Armero	300	Am	Am
Melgar	319	Am	Am
Purificación	400	Am	Am
Prado	349	Af	Af
Saldaña	425	Af	Af

Fuente: elaboración propia.

que el escenario más extremo para la temperatura del aire en el territorio colombiano en el año 2050 estaría entre 1.0 °C (escenario bajo) y un poco más de 2.5 °C (escenario alto); en nuestro estudio se puede apreciar que el aumento de la temperatura podría ser más rápido e intenso, dado que para el año 2040 se pronostican aumentos de la temperatura que, incluso en algunos casos, podrían superar los 5 °C, tal como se aprecia en la Tabla 1. Este incremento de la temperatura podría aumentar los requerimientos hídricos de los cultivos, tal como se ha reportado estudios como Shigute *et al.* 2023.

Comparando los hallazgos de este estudio con los publicados por Álvarez Bravo *et al.* (2017) en su investigación sobre la modificación de las zonas productoras de aguacate Hass en Michoacán - México debido al cambio climático, para los años 2030, 2050 y 2070, se puede destacar que el peor escenario (forzamiento radiactivo de 8.5 W/m²) se contempla como probable. Para ese escenario, los autores prevén cambios de temperatura promedio de 2.42 °C y 2.45 °C, para los cultivos ubicados en zonas de climas cálidos y semicálidos subhúmedos, respectivamente, y en cuanto a las zonas con clima templado húmedo y subhúmedo, en aquel estudio se pronostican temperaturas de 2.44 °C y 2.45 °C, respectivamente. Estos resultados son similares a los encontrados en este trabajo para los climas tropicales con invierno y verano seco representados en la Figura 3.

Conclusión

Una vez analizados los datos climatológicos del Tolima, registrados en una serie de tiempo 1980-2020, se evidenció que, como consecuencia de la variabilidad climática, se ven mayormente afectadas las zonas de clima tropical con invierno seco Aw, como en Saldaña y los climas de zona húmeda subtropical con verano frío Cfc, como en Santa Isabel. En estas zonas hay una clara tendencia de aumento de la temperatura del aire en función del tiempo, y ese incremento oscila entre 0.08 °C y 3.25 °C.

Por otro lado, mediante el análisis del cambio en la temperatura se construyeron modelos de predicción 2020-2040 que indican que la mayoría de los municipios durante épocas de fenómeno de La Niña podrían presentar un aumento de temperatura entre 0.58 °C y 5.27 °C; los municipios de Saldaña y Purificación serían los lugares posiblemente más afectados. Esto podría deberse al aumento de la nubosidad.

En el año 2040, durante periodo de El Niño, los municipios de Purificación e Ibagué presentarían aumentos de temperatura de 3.22 y 3.58 °C, respectivamente. El municipio de Melgar también presentaría un aumento de temperatura muy elevado (6.98 °C aprox.); por lo tanto, Melgar presentaría el peor escenario de cambio climático del Tolima. En

periodos de El Niño, en las zonas con persistencia de condiciones de “cielo abierto” se están presentando descensos significativos de la temperatura nocturna. Este enfriamiento nocturno podría disminuir el promedio diario de la temperatura a largo plazo. El posible calentamiento y enfriamiento detectado en el Tolima no implicaría un cambio en la clasificación climática de Köppen. Sin embargo, podría cambiar de manera significativa el resultado del balance hídrico atmosférico a nivel local en todo el departamento y, por ende, podría cambiar la distribución de las zonas de agrícolas y sistema hidrológico regional.

En Colombia, la información climatológica está disponible, en su mayoría, desde la década de 1980; la falta de series históricas de gran escala temporal limita la posibilidad de evaluar el cambio climático y su interacción con la variabilidad climática. Por lo tanto, si aumenta la cantidad y calidad de la información, mejorará entonces el nivel de asertividad en los escenarios de cambio climático.

Referencias

- Allen, R. G.; Pereira, L. S.; Raes, D. y Smith, M. (2006). *Evapotranspiración del cultivo: guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos*. Roma: FAO. <https://www.fao.org/3/x0490s/x0490s.pdf>
- Álvares, C. A.; Stape, J. L.; Sentelhas, P. C.; Gonçalves, J. D. M. y Sparovek, G. (2013). Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, 22(6), 711-728. http://143.107.18.37/material/mftandra2/ACA0225/Alvares_et_al_Koppen_climate_classBrazil_MeteoZei_2014.pdf
- Álvarez Bravo, A.; Salazar García, S.; Ruiz Corral, J. A. y Medina García, J. (2017, 15 septiembre). Escenarios de cómo el cambio climático modificará las zonas productoras de aguacate 'Hass' en Michoacán. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 19. <https://www.redalyc.org/journal/2631/263153823015/html>
- Anderson, E. P.; Marengo, J.; Villalba, R.; Halloy, S.; Young, B.; Cordero, D. y Herzog, S. K. (2011). *Consequences of climate change for ecosystems and ecosystem services in the tropical Andes*. In: *Climate Change and Biodiversity in the Tropical Andes*, 1, 1-18. https://museohn.unmsm.edu.pe/docs/pub_ictio/Josse%202011.pdf
- Calatayud, J.; Neuman, M.; Rojas, A.; Eriksson, A. y Rosvall, M. (2021). Regularities in species' niches reveal the world's climate regions. *ELife*, 10, 1-25. <https://doi.org/10.7554/eLife.58397>
- CORTOLIMA. (2007). *Plan de acción trienal 2007-2009*. Ibagué: Oficina de Planeación CORTOLIMA. https://www.cortolima.gov.co/images/la_corporacion/instrumentos_de_planificacion/plan_de_accion/pat_2007_2009.pdf
- Hussain, M. y Mahmud, I. (2019). PyMannKendall: A python package for non parametric Mann Kendall family of trend tests. *Journal of Open Source Software*, 4(39), 1556. <https://doi.org/10.21105/joss.01556>
- IDEAM y UNAL. (2018). *Variabilidad climática y cambio climático en Colombia*. Bogotá. https://www.andi.com.co/Uploads/variabilidad_636602741696419023.pdf
- IDEAM; PNUD; MADS; DNP y Cancillería. (2015). *Nuevos escenarios de cambio climático para Colombia 2011-2100*. Herramientas Científicas para la Toma de Decisiones - Enfoque Nacional - Departamental: Tercera

- Comunicación Nacional de Cambio Climático. <http://www.ideam.gov.co/documents/21021/21138/TERCERA+COMUNICACION+IDEAM+%282%29.ppsx/b8f985cd-9a10-4af1-8105-26ffb9ddefdc>
- IDEAM. (2023). Normales climatológicas. 1981-2010. <http://www.ideam.gov.co/documents/21021/553571/Promedios+Climatologicos++1981+++2010.xlsx/f28d0b07-1208-4a46-8ccf-bddd70fb4128>
- IPCC. (2022). *Climate change 2022: Impacts, adaptation, and vulnerability. Contribution of working group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. En H.-O. Pörtner; D. C. Roberts; M. Tignor; E.S. Poloczanska; K. Mintenbeck; A. Alegría; M. Craig; S. Langsdorf; S. Löschke; V. Möller; A. Okem y B. Rama (eds.). Cambridge: Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009325844>
- Irwandi, H.; Rosid, M. S. y Mart, T. (2023). Effects of climate change on temperature and precipitation in the Lake Toba region, Indonesia, based on ERA5-land data with quantile mapping bias correction. *Scientific Reports*, 13(1), 2542 (2023). <https://doi.org/10.1038/s41598-023-29592-y>
- García, M. C.; Piñeros Botero, A.; Bernal Quiroga, F. A. y Ardila Robles, E. (2012). Variabilidad climática, cambio climático y el recurso hídrico en Colombia. *Revista de Ingeniería*, 36, 60-64. <http://www.scielo.org.co/pdf/ring/n36/n36a12.pdf>
- González-Rouco, J. F.; Jiménez, J. L.; Quesada, V. y Valero, F. (2001). Quality control and homogeneity of precipitation data in the southwest of Europe. *Journal of Climate*, 1, 964-978. [http://dx.doi.org/10.1175/1520-0442\(2001\)014%3C0964:QCAHOP%3E2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0442(2001)014%3C0964:QCAHOP%3E2.0.CO;2)
- Magrin, G; Gay García, C.; Cruz, D. et al. (2007). *Latin America*. En M. Parry; O. Canziani; J. Palutifok; P. van der Linden y C. Hanson (eds.), *Climate change 2007: Impacts, adaptation and vulnerability* (pp. 581-615). Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/ar4_wg2_full_report.pdf
- Navarra. (2022). Clasificación climática de Köppen. *Meteorología y climatología de Navarra*. <http://meteo.navarra.es/definiciones/koppen.cfm>
- Ochoa, A. y Poveda, G. (2004). Diagnostics of spatial distribution of climate change signals in Colombia. *Geophysical Research Abstracts*, 6, 1-2. <https://www.geophysical-research-abstracts.net/>
- Pabón-Caicedo, J. D.; Eslava-Ramírez, J. A. y Gómez-Torres, R. E. (2001). Generalidades de la distribución espacial y temporal de la temperatura del aire y de la precipitación en Colombia. *Meteorología Colombiana*, 4, 47-59. http://168.176.14.11/fileadmin/content/geociencias/revista_meteorologia_colombiana/numero04/04_05.pdf
- Pérez, C.; Poveda, G.; Mesa, O.; Carvajal, L. F. y Ochoa, A. (1998). Evidencias de cambio climático en Colombia: Tendencias y cambios de fase y amplitud de los ciclos anual y semianual. *Bulletin de l'Institut Français d'Études Andines*, 27(3). https://www.academia.edu/download/44715499/Evidencias_de_cambio_climtico_en_Colombi20160413-19618-asd6bk.pdf
- PNUD - Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo. (2009). *Cambio climático. Memorias panel nacional de políticas de pobreza y adaptación al cambio climático en Colombia*. Recomendaciones CONPES. Bogotá: Departamento Nacional de Planeación. <https://colaboracion.dnp.gov.co/cdt/conpes/econ%C3%B3micos/3700.pdf>
- Poveda, G. (2004). La hidroclimatología de Colombia: una síntesis desde la escala inter-decadal hasta la escala diaria. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas Físicas y Naturales*, 28(107), 201-222. <https://racefyn.co/index.php/racefyn/article/download/1991/3416>
- Rahimi, J.; Laux, P. y Khalili, A. (2020). Assessment of climate change over Iran: CMIP5 results and their presentation in terms of Köppen-Geiger climate zones. *Theoretical and Applied Climatology*, 141, 183-199. <https://doi.org/10.1007/s00704-020-03190-8>
- Shigute, M.; Alamirew, T.; Abebe, A.; Ndehedehe, C. E. y Kassahun, H. T. (2023). Analysis of rainfall and temperature variability for agricultural water management in the upper Genale river basin, Ethiopia. *Scientific African*, 20. <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2023.e01635>
- Tovar, C.; Carril, A. F.; Gutiérrez, A. G.; Ahrends, A.; Fita, L.; Zaninelli, P.; Flombaum, P.; Abarzúa, A. M.; Alarcón, D.; Aschero, V.; Báez, S.; Barros, A.; Carilla, J.; Ferrero, M. E.; Flantua, S. G.; Gonzales, P.; Menéndez, C. G.; Pérez-Escobar, O. A.; Pauchard, A. ... Hollingsworth, P. M. (2022). Understanding climate change impacts on biome and plant distributions in the Andes: Challenges and opportunities. *Journal of Biogeography*, 49, 1420-1442. <https://doi.org/10.1111/jbi.14389>
- Usuarios Fernández, J. L. (2013). El cambio climático: sus causas y efectos medioambientales. *Anales de la real academia de medicina y cirugía de Valladolid*, (50), 71-98. <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/4817473.pdf>
- Yepes Mayorga, A. (2012, marzo). Cambio climático: estrategias de gestión con el tiempo en contra. *Orinoquía*, 16(1), 77-92. <http://www.scielo.org.co/pdf/rori/v16n1/v16n1a09.pdf>