



Tendencias de la temperatura del aire y la amplitud térmica en la Región Central de Costa Rica: implicaciones agroclimáticas para el cultivo de café

Johaner Rosales Flores^{1(*)} y Islande Cristina Delgado Monge²

¹Escuela de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional, Heredia, Costa Rica. E-mail: johaner@una.cr

²Escuela de Matemática, Universidad Nacional, Heredia, Costa Rica. E-mail: islande.delgado.monge@una.cr

(*) Autor para correspondencia.

INFORMACIÓN DEL ARTÍCULO

Historial del artículo:

Recibido el 23 de julio de 2025

Aceptado el 18 de junio de 2026

Palabras clave

cambio climático

tendencias térmicas

agroclimatología

cultivo de café

amplitud térmica

Coffea arabica

Costa Rica

RESUMEN

La magnitud y la variabilidad espacial de las tendencias térmicas en la Región Central de Costa Rica han sido poco documentadas, pese a la importancia agroclimática e histórica de este territorio para la caficultura nacional. El objetivo de esta investigación fue analizar las tendencias de la temperatura del aire y la amplitud térmica, así como sus implicaciones agroclimáticas para el cultivo de café. Se analizaron registros históricos de temperatura máxima, mínima y media de cinco estaciones meteorológicas durante el período 1982–2017, tras aplicar control de calidad, estadística descriptiva y análisis de tendencias. Se identificaron incrementos significativos en las temperaturas máximas, mínimas y medias. A escala regional, la temperatura máxima media aumentó 0,14 °C década⁻¹ y la máxima absoluta 0,47 °C década⁻¹, mientras que la temperatura mínima media y la temperatura media aumentaron 0,06 y 0,10 °C década⁻¹, respectivamente. Las mayores tasas de calentamiento se registraron en las estaciones Fabio Baudrit y RECOPE La Garita, confirmando la variabilidad espacial del calentamiento. Los resultados sugieren cambios graduales en las condiciones agroclimáticas y en la amplitud térmica regional, con posibles implicaciones para la aptitud agroclimática del cultivo, la calidad del grano y el diseño de estrategias de adaptación y planificación agroclimática del sector cafetalero costarricense.

© 2026 SBAgro. All rights reserved.

Introducción

El clima corresponde al comportamiento promedio de la atmósfera y a la variabilidad de sus elementos a lo largo del tiempo en una región determinada (Murphy & Hurtado, 2016). Entre estos elementos, la temperatura del aire constituye una de las variables de mayor importancia para los sistemas agrícolas, debido a su influencia sobre procesos fisiológicos como la fotosíntesis, la respiración,

el crecimiento, el desarrollo fenológico y la productividad de los cultivos. En Costa Rica, la temperatura presenta una marcada variabilidad espacial asociada principalmente a la altitud, generando condiciones climáticas diferenciadas que determinan la aptitud agroclimática de numerosas actividades agrícolas.

Las modificaciones en el régimen térmico pueden afectar la duración de las fases fenológicas, la disponibilidad hídrica, la incidencia de plagas y enfermedades, así

como la distribución geográfica de las zonas aptas para la producción agrícola. En las últimas décadas, diversos estudios han documentado incrementos significativos de la temperatura del aire asociados al cambio climático global, situación que plantea importantes desafíos para la sostenibilidad de los sistemas productivos, especialmente en regiones tropicales donde numerosos cultivos operan cerca de sus umbrales óptimos de desarrollo.

La información climática constituye una herramienta fundamental para la planificación agrícola y la evaluación de la aptitud productiva de los territorios. En este sentido, Olivares et al. (2018) definieron zonas agroclimáticamente aptas para el cultivo de maíz en el estado Carabobo, Venezuela, considerando variables de clima, suelo y relieve. Los autores identificaron aproximadamente 590 km² de tierras con condiciones favorables para la producción del cultivo, destacando la importancia de la caracterización agroclimática como apoyo para la toma de decisiones y la sostenibilidad de los sistemas agrícolas.

Particularmente en la caficultura, la temperatura constituye uno de los principales factores que regulan el crecimiento, desarrollo, rendimiento y calidad del cultivo. Rentería et al. (2024) destacan la necesidad de fortalecer estrategias de adaptación basadas en el mejoramiento genético y en prácticas agrícolas sostenibles para enfrentar los efectos del cambio climático sobre la producción de café. Asimismo, resaltan la importancia de desarrollar variedades con mayor tolerancia a condiciones ambientales adversas y de optimizar el manejo agronómico para garantizar la sostenibilidad futura de la actividad cafetalera.

Por su parte, Baltazar-da Silva et al. (2020) realizaron una caracterización agroclimática de la provincia de Uigé, Angola, en función del desarrollo del café Robusta, analizando principalmente el comportamiento de las temperaturas y precipitaciones. Los resultados mostraron que el 86,3 % de la superficie evaluada presentaba condiciones climáticas favorables para el cultivo, mientras que las principales limitaciones se asociaron a la distribución de las precipitaciones. Estos estudios evidencian la estrecha relación existente entre las condiciones climáticas y la aptitud agroclimática de los sistemas cafetaleros.

La Región Central de Costa Rica concentra una parte importante de la producción nacional de café y alberga zonas de reconocido prestigio por la calidad de sus granos. Sin embargo, la evidencia disponible sobre la magnitud y variabilidad espacial de las tendencias térmicas observadas en esta región aún es limitada. El conocimiento de estos cambios resulta fundamental para comprender posibles modificaciones en la aptitud agroclimática regional y apoyar el diseño de estrategias de adaptación frente al cambio climático.

En este contexto, el objetivo de esta investigación fue analizar las tendencias de la temperatura máxima, mínima y media del aire, así como los cambios asociados a la amplitud térmica en la Región Central de Costa Rica durante el período 1982–2017, y discutir sus posibles implicaciones agroclimáticas para el cultivo de café.

Material y Métodos

La República de Costa Rica está ubicada en la Zona Tropical del hemisferio norte, entre las coordenadas geográficas 8° 02' 26" - 11° 13' 12" de latitud al norte del ecuador y, 82° 33' 48" y 85° 57' 57" de longitud al oeste de Greenwich; en la parte central o ístmica del continente americano, entre los paralelos del Trópico de Cáncer y el Trópico de Capricornio (Flores Silva, 1991). La localización en esta región le confiere a su entorno: bosques, red hidrográfica, suelos y clima, características tropicales según la clasificación climática de Köppen (Arnfield, 2025); esto, aunado a sistemas orográficos importantes, donde se destaca la presencia de montañas, llanuras, valles y mesetas que cubren toda la extensión del país, contribuye a que las variaciones espaciales de las variables climáticas sean de considerable magnitud (IMN, 2025.). Asimismo, al país lo atraviesa un sistema montañoso de noroeste a sureste que lo divide en dos vertientes: Pacífica y Caribe, cada una con su propio régimen de precipitaciones y temperaturas (Costa Rica, 2021).

Administrativamente, Costa Rica no solo está dividida en siete provincias, sino que para efectos de planificación regional se han establecido seis regiones (Costa Rica, 2021). Específicamente en este estudio se trabajó con la Región Central de Costa Rica (RCC), la cual comprende dos valles: el Valle Central Occidental (corresponde a la depresión del río grande de Tárcoles) y el Valle Oriental (comprende la depresión del río Reventazón y sus afluentes); en las partes bajas del Valle Occidental, se puede encontrar un clima seco con marcada influencia Pacífico, mientras en las partes medias se experimenta un clima templado y en las partes altas el clima es más lluvioso y frío, característico de las zonas de montaña (IMN, 2025).

El clima es uno de los factores más importantes y de carácter limitante en la producción agropecuaria y forestal, se manifiesta por la influencia directa o indirecta de sus elementos sobre los seres vivos. Además, determina las actividades económicas de una región y en especial las actividades de producción agrícola. El rendimiento óptimo de las especies está determinado por las bondades de las condiciones agroclimáticas donde crecen y se desarrollan, mientras el éxito del ciclo de cultivo depende del tiempo atmosférico que predomina durante el mismo (Jiménez, 1985).

Para el análisis se utilizaron registros de temperatura

máxima, mínima y media procedentes de cinco estaciones meteorológicas ubicadas en la Región Central de Costa Rica: Santa Lucía (SL), Santa Bárbara (SB), Aeropuerto Internacional Juan Santamaría (AJS), Fabio Baudrit (FB) y RECOPE La Garita (RLG). Estas estaciones fueron seleccionadas por presentar la mayor disponibilidad de información térmica histórica dentro de la región de estudio. La información analizada comprende el período 1982–2017 y fue suministrada por el Instituto Meteorológico Nacional de Costa Rica (IMN). No obstante, la longitud de las series y la cantidad de datos disponibles variaron entre estaciones debido a diferencias en la continuidad de los registros meteorológicos, situación común en bases de datos climatológicas de largo plazo.

Los datos meteorológicos diarios se agruparon en forma mensual y anual, los mismos se caracterizaron mediante estadísticos descriptivos (Wilks, 2011). Se estudió la normalidad de los datos mediante la prueba de Kolmogorov-Smirnov (50 datos o más) o la prueba Shapiro-Wilk (menos de 50 datos), de acuerdo con los criterios estadísticos descritos por Montgomery & Runger (2010). Para determinar la significancia del comportamiento de las series se aplicó la prueba estadística ANOVA o Kruskal-Wallis, según el cumplimiento o no de los supuestos paramétricos; el nivel de confianza fue del 95 % y se utilizó el programa IBM SPSS Statistics, versión 30.0 (IBM CORP., 2024). Una vez realizado este análisis se procedió al cálculo de índices necesarios para el análisis de las tendencias térmicas regionales.

Además, en este trabajo se realizó el análisis de consistencia sobre la base de los datos utilizados siguiendo los lineamientos de la Organización Meteorológica Mundial (WMO, 2021) mediante los siguientes procesos: a) lectura de datos y control de formatos (registros inexistentes, registros repetidos, registros con códigos inexistentes, errores en los registros de dato faltante), b) detección de errores indiscutibles (temperatura máxima inferior a la mínima), y c) detección de “outliers”, para este último punto se realizó un análisis visual gráfico para verificar la existencia de valores fuera de rango.

Con el fin de cuantificar la magnitud de los cambios observados en las variables térmicas, se realizó adicionalmente un análisis exploratorio de tendencia lineal, estimando la tasa de cambio expresada en $^{\circ}\text{C década}^{-1}$ para las temperaturas máximas, mínimas y medias, tanto a escala regional como por estación meteorológica.

Resultados y Discusión

Variación interanual de la temperatura máxima

Se calcularon los promedios anuales de las temperaturas máximas registradas diariamente y se confeccionó una serie de tx_{ma} , integrando la información

de las cinco estaciones de la RCC; se observó un valor promedio de la temperatura máxima media anual de $27,6^{\circ}\text{C}$ con una desviación estándar de $2,5^{\circ}\text{C}$ y una mediana de $27,8^{\circ}\text{C}$. Esta serie presentó un valor de asimetría moderadamente sesgado hacia la izquierda y cercano a cero ($-0,17$) con un valor de curtosis negativo ($-0,23$), lo que indicó que se aproxima a una distribución platicúrtica, es decir una distribución ligeramente achatada. Se determinó la variación anual de la temperatura del aire para el periodo 1985–2017. También se analizó la tendencia de las temperaturas máximas medias regionales. Se observó que las temperaturas máximas medias anuales (tx_{ma}) en la RCC han aumentado a medida que han transcurrido los años. La prueba estadística aplicada indicó que este comportamiento fue significativo ($p < 0,001$), lo que evidencia un incremento sostenido de las temperaturas máximas medias regionales durante el período de estudio.

Con el propósito de cuantificar la magnitud de estos cambios, se realizó un análisis complementario de tendencia lineal. Los resultados mostraron una tasa de incremento aproximada de $0,14^{\circ}\text{C}$ por década para la temperatura máxima media regional. Asimismo, la temperatura máxima absoluta anual presentó una tasa de aumento cercana a $0,47^{\circ}\text{C}$ por década, lo que indica que los eventos térmicos extremos han aumentado a una velocidad superior a la observada para las temperaturas medias.

No obstante, la magnitud del calentamiento no fue homogénea entre las estaciones meteorológicas analizadas. Las mayores tasas de incremento de la temperatura máxima media anual se observaron en las estaciones Fabio Baudrit ($0,73^{\circ}\text{C década}^{-1}$) y RECOPE La Garita ($0,77^{\circ}\text{C década}^{-1}$), mientras que Santa Lucía presentó un incremento más moderado ($0,33^{\circ}\text{C década}^{-1}$). Por su parte, Santa Bárbara ($0,13^{\circ}\text{C década}^{-1}$) y el Aeropuerto Internacional Juan Santamaría ($0,02^{\circ}\text{C década}^{-1}$) mostraron los menores incrementos. Esta variabilidad espacial sugiere que el calentamiento regional está siendo modulado por factores locales como la altitud, la topografía, los cambios en el uso del suelo, la urbanización y las características microclimáticas propias de cada sitio de observación.

Desde una perspectiva agroclimática, estos resultados poseen especial relevancia para la caficultura de la RCC. Diversos estudios han demostrado que incrementos sostenidos de la temperatura pueden acelerar el desarrollo fenológico del cafeto, reducir el período de llenado del fruto, modificar los patrones de floración y aumentar la demanda atmosférica de agua. Ahmed et al. (2021) señalan que las variaciones térmicas influyen directamente sobre la acumulación de metabolitos secundarios, la composición química del grano y diversos atributos sensoriales asociados con la calidad del café. Además, el incremento de las temperaturas máximas puede favorecer condiciones

de estrés térmico en zonas cafetaleras de menor altitud, reduciendo progresivamente la aptitud agroclimática de algunas áreas actualmente destinadas al cultivo de *Coffea arabica*. En consecuencia, los resultados obtenidos sugieren la necesidad de fortalecer estrategias de adaptación, tales como el manejo de sombra, la conservación de cobertura vegetal, la selección de materiales genéticos más tolerantes y la planificación territorial orientada a la sostenibilidad de la producción cafetalera.

Se elaboró otra serie con los valores de t_{xAa} en la región tomando en cuenta solamente la temperatura máxima absoluta presentada en cada año. Se observó que el valor promedio de la t_{xAa} fue 32,6°C, con una mediana de 33,1°C y una desviación estándar de 2,2°C. El valor máximo (35,6°C) se registró en febrero de 2010 en la estación Fabio Baudrit; en cambio, el valor mínimo (28,5°C) se registró en febrero de 1988 en la estación Santa Lucía. Esta serie mostró un valor de asimetría marcadamente sesgada a la izquierda, así como un valor de curtosis negativo, aproximándose a una distribución platocúrtica, mayor a la serie de t_{xma} . Se determinó la variación anual de la t_{xAa} del aire para el periodo 1985-2017. También se analizó la tendencia de las temperaturas máximas absolutas regionales.

Se observó que las t_{xAa} en la región también han aumentado a medida que han transcurrido los años. A partir de estos valores, se determinó si las diferencias encontradas son significativas, para ello se aplicó la prueba de contraste correspondiente y se encontró que estas diferencias sí son estadísticamente significativas $p < .001$, lo que indica que desde el inicio de la serie hasta el año 2017, las t_{xAa} han aumentado significativamente al igual que las t_{xma} .

Se calcularon los promedios de las t_{xma} para cada una de las estaciones. Con esta información, se confeccionó una nueva serie de t_{xma} para cada una de las estaciones. Se observó un valor promedio de la t_{xma} para la estación: SL (25,2°C), AJS (28,3°C), SB (27,7°C), FB (29,3°C) y RLG (29,1°C); con una desviación estándar de 1,8°C para las estaciones SL, AJS y SB; mientras que la desviación estándar fue de 2,0°C para la estación FB y de 1,9°C para estación RLG. La mediana fue de: 25,1°C (SL), 28,4°C (AJS), 28,0°C (SB), 29,3°C (FB) y 29,1°C (RLG). Se analiza a continuación el comportamiento en cada una de estas estaciones. Se encontró que estas diferencias sí son estadísticamente significativas $p < .001$, a continuación, se muestran cuáles fueron estas diferencias para cada una de las estaciones.

Estación Santa Lucía: La estación SL presentó un valor de asimetría ligeramente sesgado a la derecha y muy próximo a cero, lo que indicó que la distribución es prácticamente simétrica, es decir, existe aproximadamente la misma cantidad de valores a los dos lados de la media. En relación con el valor de curtosis de la serie, este fue

positivo, aproximándose a una distribución leptocúrtica, dicho de otra manera, esto es una distribución puntiaguda. Se determinó la variación anual de la temperatura del aire para el periodo 1985-2017. También se analizó la tendencia de las t_{xma} . El ser positiva la pendiente de la línea de tendencia, indica que las t_{xma} de la estación Santa Lucía, tienden a aumentar a medida que han transcurrido los años.

Estación Aeropuerto Juan Santamaría: La serie de la estación AJS presentó asimetría marcadamente sesgada a la izquierda y, además un valor de curtosis positivo, aproximándose a una distribución leptocúrtica, es decir una distribución puntiaguda con mayor concentración de datos en torno a la media. Se determinó la variación anual de la temperatura del aire para el periodo 1985-2017. También se analizó la tendencia de las t_{xma} en la estación AJS. El ser positiva la pendiente de la línea de tendencia, indica que las t_{xma} de la estación AJS, tienden a aumentar a medida que han transcurrido los años.

Estación Santa Bárbara: La serie estudiada presentó el mayor valor de asimetría, la cual fue marcadamente sesgada a la izquierda. Respecto al valor de curtosis, este fue positivo, aproximándose a una distribución leptocúrtica, en otras palabras, es una distribución puntiaguda. Se determinó la variación anual de la temperatura del aire para el periodo 1985-2017. También se analizó la tendencia de las t_{xma} en la estación SB. El ser positiva la pendiente de la línea de tendencia, indica que las t_{xma} de la estación SB, tienden a aumentar a medida que han transcurrido los años.

Estación Fabio Baudrit: La serie presentó un valor de asimetría moderadamente sesgado a la izquierda y, además, un valor de curtosis positivo, aproximándose a una distribución leptocúrtica, dicho de otra manera, es una distribución puntiaguda. Se determinó la variación anual de la temperatura del aire para el periodo 1985-2017. También se analizó la tendencia de las t_{xma} en la estación FB. El ser positiva la pendiente de la línea de tendencia, indica que las t_{xma} de la estación FB, tienden a aumentar a medida que han transcurrido los años.

Estación RECOPE La Garita: La serie presentó un valor de asimetría moderadamente sesgado a la izquierda y, además, un valor de curtosis positivo, aproximándose a una distribución leptocúrtica, en otros términos, es una distribución puntiaguda. Se determinó la variación anual de la temperatura del aire para el periodo 1985-2017. También se analizó la tendencia de las t_{xma} en la estación RLG. El ser positiva la pendiente de la línea de tendencia, indica que las t_{xma} de la estación RLG, tienden a aumentar

a medida que han transcurrido los años.

Se elaboró otra serie con los valores de t_{xAa} por estación, tomando en cuenta solamente la temperatura máxima absoluta presentada en cada año. Se observó un valor de la t_{xAa} para la estación: SL (33,2°C), AJS (34,5°C), SB (34,0°C), FB (35,6°C) y RLG (35,0°C); con una desviación estándar de 1,0°C para la estación SL y para la estación SB, una desviación estándar de 0,8°C para la estación AJS, una desviación estándar de 1,1°C para la estación FB y una desviación estándar de 0,9°C para estación RLG. La mediana fue de: 29,9°C (SL), 32,8°C (AJS), 32,0°C (SB), 34,0°C (FB) y 33,2°C (RLG). Se analiza a continuación el comportamiento en cada una de estas estaciones. Para determinar si las diferencias encontradas son significativas, se aplicó la prueba de contraste correspondiente y se encontró que estas diferencias sí son estadísticamente significativas $p < .001$.

Estación Santa Lucía: La serie presentó el mayor valor de asimetría, el cual fue marcadamente sesgado a la derecha y, además, un valor de curtosis positivo, aproximándose a una distribución leptocúrtica, es decir una distribución puntiaguda. Se determinó la variación anual de la temperatura del aire para el periodo 1985-2017. También se analizó la tendencia de las t_{xAa} en la estación SL. El ser positiva la pendiente de la línea de tendencia, indica que las t_{xAa} de la estación SL, tienden a aumentar a medida que han transcurrido los años.

Estación Aeropuerto Juan Santamaría: La serie presentó asimetría marcadamente sesgada a la derecha y, además, un valor de curtosis positivo, aproximándose a una distribución leptocúrtica o, lo que es lo mismo, una distribución puntiaguda con mayor concentración de datos en torno a la media. Se determinó la variación anual de la temperatura del aire para el periodo 1985-2017. También se analizó la tendencia de las t_{xAa} en la estación AJS. El ser negativa la pendiente de la línea de tendencia, indica que las t_{xAa} de la estación AJS, tienden a disminuir a medida que han transcurrido los años.

Estación Santa Bárbara: La serie presentó un valor de asimetría marcadamente sesgado a la derecha y, además, un valor de curtosis positivo, aproximándose a una distribución leptocúrtica, esto quiere decir una distribución puntiaguda. Se determinó la variación anual de la temperatura del aire para el periodo 1985-2017. También se analizó la tendencia de las t_{xAa} en la estación SB. El ser positiva la pendiente de la línea de tendencia, indica que las t_{xAa} de la estación SB, tienden a aumentar a medida que han transcurrido los años.

Estación Fabio Baudrit: La serie presentó un valor

de asimetría marcadamente sesgado a la izquierda y, además, un valor de curtosis negativo, aproximándose a una distribución platicúrtica, es decir una distribución achatada. Se determinó la variación anual de la temperatura del aire para el periodo 1985-2017. También se analizó la tendencia de las t_{xAa} en la estación FB. El ser positiva la pendiente de la línea de tendencia, indica que las t_{xAa} de la estación FB, tienden a aumentar a medida que han transcurrido los años.

Estación RECOPE La Garita: La serie presentó un valor de asimetría marcadamente sesgado a la derecha y, además, un valor de curtosis negativo, aproximándose a una distribución platicúrtica o achatada. Se determinó la variación anual de la temperatura del aire para el periodo 1985-2017. También se analizó la tendencia de las t_{xAa} en la estación RLG. El ser positiva la pendiente de la línea de tendencia, indica que las t_{xAa} de la estación RLG, tienden a aumentar a medida que han transcurrido los años.

Por otra parte, teniendo en cuenta que la variable estación en relación con la t_{xAa} cumple los supuestos de normalidad y homocedasticidad, aunado al hecho que está compuesta por cinco estaciones y que las diferencias son estadísticamente significativas, se aplicó la prueba de contrastes múltiples a posteriori mediante el método Scheffe para determinar entre cuales estaciones se daban diferencias significativas. Las diferencias encontradas entre la estación SL y AJS p -valor $< 0,001$, entre SL y SB p -valor $< 0,001$, entre SL y FB p -valor $< 0,001$, entre SL y RLG p -valor $< 0,001$, entre AJS y FB ($p = 0,006$), entre SB y FB p -valor $< 0,001$, entre SB y RLG ($p = 0,039$), fueron estadísticamente significativas.

Variación interanual de la temperatura mínima

Se calcularon los promedios de las temperaturas mínimas diarias para cada año y se confeccionó una serie de tíma, integrando la información de las cinco estaciones de la RCC. Se observó un valor promedio de la tíma de 17,4°C con una desviación estándar de 2,2°C y una mediana de 17,7°C. Esta serie presentó un valor de asimetría marcadamente sesgada a la izquierda y, además, un valor de curtosis positivo lo cual indicó que se aproxima a una distribución. Se determinó la variación anual de la temperatura del aire para el periodo 1985-2017. También se analizó la tendencia de las tíma en la Región Central de Costa Rica. Se observó que las tíma en la RCC han aumentado a medida que han transcurrido los años. Para determinar la significatividad de este comportamiento, se aplicó la prueba correspondiente y se determinó que dicho comportamiento es significativo $p < .001$, lo que indicó que desde el inicio de la serie hasta el año 2017, las tíma han aumentado significativamente.

Con el propósito de cuantificar la magnitud de los

cambios observados, se realizó un análisis complementario de tendencia lineal. Los resultados mostraron una tasa de incremento aproximada de 0,06 °C por década para la temperatura mínima media regional y de 0,08 °C por década para la temperatura mínima absoluta regional. Aunque estos incrementos fueron inferiores a los observados para las temperaturas máximas, evidencian una tendencia consistente hacia condiciones térmicas más cálidas durante las horas nocturnas y los periodos de menor temperatura.

A nivel espacial se observó una respuesta diferenciada entre estaciones meteorológicas. Las estaciones Santa Lucía y RECOPE La Garita presentaron los mayores incrementos de temperatura mínima media, con aumentos aproximados de 0,22 y 0,23 °C por década, respectivamente. Por su parte, Santa Bárbara mostró un incremento más moderado (0,10 °C por década), mientras que el Aeropuerto Internacional Juan Santamaría presentó una variación prácticamente estable. En contraste, la estación Fabio Baudrit mostró una ligera tendencia negativa en la temperatura mínima media. Estas diferencias sugieren que factores locales como la altitud, la topografía, la cobertura vegetal, la urbanización y los cambios en el uso del suelo pueden influir de manera importante sobre el comportamiento térmico nocturno.

Desde una perspectiva agroclimática, el incremento de las temperaturas mínimas reviste especial importancia para la producción de café. Las temperaturas nocturnas regulan procesos fisiológicos asociados con la respiración, la acumulación de biomasa y el balance energético de las plantas. Un aumento sostenido de las temperaturas mínimas puede incrementar la respiración de mantenimiento, reduciendo la eficiencia en el uso de los fotoasimilados y afectando potencialmente el llenado y la calidad del grano. Asimismo, temperaturas nocturnas más elevadas pueden modificar los ciclos fenológicos del cultivo y contribuir a una reducción gradual de la aptitud agroclimática de algunas zonas cafetaleras de menor altitud.

Por separado, se elaboró otra serie con los valores de *tiAa* para cada año completo. La serie presentó un valor promedio de 9,2 °C, con una mediana de 9,0 °C y una desviación estándar de 1,1 °C. El valor mínimo (7,0 °C) se registró en febrero de 1995 en la estación Santa Lucía; en contraste, el valor máximo (11,2 °C) se registró en febrero y abril de 2013 igualmente en Santa Lucía.

Esta serie mostró un valor de asimetría ligeramente sesgado a la izquierda y, además, un valor de curtosis negativo lo que se aproxima a una distribución platicúrtica. Se determinó la variación anual de la temperatura del aire para el periodo 1983-2017. También se analizó la tendencia de las *tiAa* en la Región Central de Costa Rica. Se observó que las *tiAa* presentaron una tendencia positiva. Para determinar la significatividad de este comportamiento, se aplicó la prueba estadística respectiva y se determinó

que dicho comportamiento sí es significativo $p\text{-valor} < 0,001$, así, las *tiAa* han aumentado significativamente desde 1983 hasta 2017.

Se calcularon los promedios de las *tima* para cada una de las estaciones. Con esta información, se confeccionó una nueva serie de *tima* para cada una de las estaciones en estudio. Se observó un valor promedio de la *tima* para la estación: SL (15,4 °C), AJS (18,6 °C), SB (16,4 °C), FB (18,7 °C) y RLG (19,0 °C); con una desviación estándar de 1,8 °C para la estación SL, 1,3 °C para AJS, 1,7 °C para SB; 1,2 °C para la estación FB y 1,4 °C para la estación RLG. La mediana fue de: 15,5 °C (SL), 18,7 °C (AJS), 16,5 °C (SB), 18,7 °C (FB) y 19,0 °C (RLG). Se analiza a continuación el comportamiento en cada una de estas estaciones. Para determinar si las diferencias encontradas son significativas, se aplicó la prueba estadística respectiva y se encontró que estas diferencias sí son estadísticamente significativas $p\text{-valor} < 0,001$, a continuación, se muestran cuáles fueron estas diferencias para cada una de las estaciones.

Estación Santa Lucía: La serie estudiada de la estación SL presentó el mayor valor de asimetría, el cual fue marcadamente sesgado a la izquierda y, además, un valor de curtosis positivo, aproximándose a una distribución leptocúrtica, es decir una distribución puntiaguda. Se determinó la variación anual de la temperatura del aire para el periodo 1983-2017. También se analizó la tendencia de las *tima* en la estación SL. El ser positiva la pendiente de la línea de tendencia, indica que las *tima* de la estación SL, tienden a aumentar a medida que han transcurrido los años.

Estación Aeropuerto Juan Santamaría: La serie de la estación AJS presentó asimetría moderadamente sesgada a la izquierda y, además, un valor de curtosis positivo, aproximándose a una distribución leptocúrtica, es decir una distribución puntiaguda con mayor concentración de datos en torno a la media. Se determinó la variación anual de la temperatura del aire para el periodo 1983-2017. También se analizó la tendencia de *tima* en la estación AJS. El ser negativa la pendiente de la línea de tendencia, indica que las *tima* de la estación AJS, tienden a disminuir a medida que han transcurrido los años.

Estación Santa Bárbara: La serie estudiada presentó un valor de asimetría marcadamente sesgado a la izquierda y, además, un valor de curtosis positivo, aproximándose a una distribución leptocúrtica, es decir una distribución puntiaguda con mayor concentración de datos en torno a la media. Se determinó la variación anual de la temperatura del aire para el periodo 1983-2017. También se analizó la tendencia de *tima* en la estación SB. El ser positiva la pendiente de la línea de tendencia, indica que las *tima*

de la estación SB, tienden a aumentar a medida que han transcurrido los años.

Estación Fabio Baudrit: La serie estudiada presentó un valor de asimetría moderadamente sesgado a la izquierda y, además un valor de curtosis positivo, aproximándose a una distribución leptocúrtica, es decir una distribución puntiaguda con mayor concentración de datos en torno a la media. Se determinó la variación anual de la temperatura del aire para el periodo 1983-2017. También se analizó la tendencia de las tima en la estación FB. El ser negativa la pendiente de la línea de tendencia, indica que las tima de la estación FB, tienden a disminuir a medida que han transcurrido los años.

Estación RECOPE La Garita: La serie estudiada presentó un valor de asimetría ligeramente sesgado a la izquierda; además, un valor de curtosis positivo, aproximándose a una distribución leptocúrtica, es decir una distribución puntiaguda con mayor concentración de datos en torno a la media. Se determinó la variación anual de la temperatura del aire para el periodo 1983-2017. También se analizó la tendencia de las tima en la estación RLG. El ser positiva la pendiente de la línea de tendencia, indica que las tima de la estación RLG, tienden a aumentar a medida que han transcurrido los años.

Teniendo en cuenta que la variable estación en relación con la tima cumple los supuestos de normalidad y homocedasticidad, aunado al hecho que está compuesta por cinco estaciones y que las diferencias son estadísticamente significativas, se aplicó los contrastes múltiples a posteriori mediante el método Scheffe para determinar entre cuales estaciones se daban diferencias significativas. Las diferencias encontradas entre la estación SL y AJS p -valor $<0,001$, entre SL y SB p -valor $<0,001$, entre SL y FB p -valor $<0,001$, entre SL y RLG ($p<0,001$), entre AJS y SB ($p<0,001$), entre AJS y RLG p -valor $<0,001$, entre SB y FB p -valor $<0,001$, entre SB y RLG p -valor $<0,001$, entre FB y RLG p -valor $<0,001$ fueron estadísticamente significativas.

Se calcularon los promedios de las tiAa para cada una de las estaciones. Con esta información, se confeccionó una nueva serie de tiAa para cada una de las estaciones en estudio. Se observó un valor promedio de la tiAa para la estación: SL (15,4 °C), AJS (18,6 °C), SB (16,4 °C), FB (18,7 °C) y RLG (19,0 °C); con una desviación estándar de 1,8 °C para la estación SL, una de 1,3 °C para AJS, una de 1,7°C para SB, una de 1,2 °C para FB y una de 1,4 °C para la estación RLG. La mediana fue de: 15,5°C (SL), 18,7 °C (AJS), 16,5 °C (SB), 18,7 °C (FB) y 19,0 °C (RLG). Para determinar si las diferencias encontradas son significativas, se aplicó la prueba de contraste correspondiente y se encontró que estas diferencias sí son estadísticamente significativas $p<.001$, a continuación, se muestra cuáles fueron estas diferencias

para cada una de las estaciones. Se analiza a continuación el comportamiento en cada una de estas estaciones.

Estación Santa Lucía: La serie estudiada presentó un valor de asimetría ligeramente sesgado a la izquierda y muy próximo a cero, lo que indicó que la distribución es prácticamente simétrica, es decir, existe aproximadamente la misma cantidad de valores a los dos lados de la media. En relación con el valor de curtosis, este fue negativo, aproximándose a una distribución platicúrtica, es decir una distribución achatada con baja concentración de datos en torno a la media. Se determinó la variación anual de la temperatura del aire para el periodo 1983-2017. También se analizó la tendencia de las tiAa en la estación SL. El ser positiva la pendiente de la línea de tendencia, indica que las tiAa de la estación SL, tienden a aumentar a medida que han transcurrido los años.

Estación Aeropuerto Juan Santamaría: La serie estudiada presentó un valor de asimetría marcadamente sesgada a la derecha y, además, un valor de curtosis positivo, aproximándose a una distribución leptocúrtica, es decir una distribución puntiaguda con mayor concentración de datos en torno a la media. Se determinó la variación anual de la temperatura del aire para el periodo 1983-2017. También se analizó la tendencia de las tiAa en la estación AJS. El ser negativa la pendiente de la línea de tendencia, indica que las tiAa de la estación AJS, tienden a disminuir a medida que han transcurrido los años.

Estación Santa Bárbara: La serie estudiada presentó un valor de asimetría marcadamente sesgado a la derecha y, además, un valor de curtosis positivo, aproximándose a una distribución leptocúrtica, es decir una distribución puntiaguda con mayor concentración de datos en torno a la media. Se determinó la variación anual de la temperatura del aire para el periodo 1983-2017. También se analizó la tendencia de las tiAa en la estación SB. El ser positiva la pendiente de la línea de tendencia, indica que las tiAa de la estación SB, tienden a aumentar a medida que han transcurrido los años.

Estación Fabio Baudrit: La serie estudiada presentó un valor de asimetría marcadamente sesgado a la izquierda y, además, un valor de curtosis positivo, aproximándose a una distribución leptocúrtica, es decir una distribución puntiaguda con mayor concentración de datos en torno a la media. Se determinó la variación anual de la temperatura del aire para el periodo 1983-2017. También se analizó la tendencia de las tiAa en la estación FB. El ser negativa la pendiente de la línea de tendencia, indica que las tiAa de la estación FB, tienden a disminuir a medida que han transcurrido los años.

Estación RECOPE La Garita: La serie estudiada presentó un valor de asimetría moderadamente sesgado a la derecha y, además, un valor de curtosis positivo, aproximándose a una distribución leptocúrtica, es decir una distribución puntiaguda con mayor concentración de datos en torno a la media. Se determinó la variación anual de la temperatura del aire para el periodo 1983-2017. También se analizó la tendencia de las *t*Aa en la estación RLG. El ser negativa la pendiente de la línea de tendencia, indica que las *t*Aa de la estación RLG, tienden a disminuir a medida que han transcurrido los años.

Variación interanual de la temperatura media

Se calcularon los promedios de las temperaturas medias diarias para cada año y se confeccionó una serie de *t*ma, integrando la información de las cinco estaciones de la RCC. Se observó un valor promedio de la *t*ma de 21,6 °C con una desviación estándar de 1,8 °C y una mediana de 21,7 °C. Esta serie presentó un valor de asimetría ligeramente sesgado a la izquierda y cercano a cero y, además, un valor de curtosis negativo, lo que indicó que se aproxima a una distribución platicúrtica, es decir una distribución ligeramente achatada con baja concentración de datos en torno a la media. Se determinó la variación anual de la temperatura del aire para el periodo 1983-2017. También se analizó la tendencia de las *t*ma en la RCC. Se observó que las *t*ma han aumentado a medida que han transcurrido los años. Para determinar la significatividad de este comportamiento, se aplicó la prueba estadística correspondiente y se determinó que dicho comportamiento es significativo $p < .001$, lo que indicó que desde el inicio de la serie hasta el año 2017, las *t*ma han ido aumentando significativamente.

Con el propósito de cuantificar la magnitud de los cambios observados, se realizó un análisis complementario de tendencia lineal. Los resultados mostraron una tasa de incremento aproximada de 0,10 °C por década para la temperatura media regional, lo que confirma la existencia de un proceso de calentamiento sostenido en la RCC durante el período de estudio.

El comportamiento de la temperatura media también presentó diferencias entre estaciones meteorológicas. Las mayores tasas de incremento se registraron en las estaciones Santa Lucía (0,46 °C década⁻¹) y RECOPE La Garita (0,42 °C década⁻¹), donde las tendencias observadas resultaron estadísticamente significativas. Por su parte, Fabio Baudrit (0,28 °C década⁻¹), Santa Bárbara (0,12 °C década⁻¹) y el Aeropuerto Internacional Juan Santamaría (0,06 °C década⁻¹) mostraron tendencias positivas de menor magnitud, aunque sin evidencia estadística suficiente para confirmar cambios significativos durante el período analizado. Estos resultados evidencian una

importante variabilidad espacial en la magnitud del calentamiento observado, probablemente asociada a diferencias altitudinales, condiciones locales del paisaje y características microclimáticas propias de cada estación.

Desde una perspectiva agroclimática, el aumento de la temperatura media puede tener implicaciones relevantes para la producción de café en la RCC. Diversos estudios han señalado que incrementos sostenidos de la temperatura pueden acelerar el desarrollo fenológico del cultivo, modificar los patrones de floración y maduración, así como alterar la distribución altitudinal de las zonas óptimas para la producción de *Coffea arabica*. Faraz et al. (2023) identifican a esta especie como una de las más sensibles al calentamiento climático entre los principales cultivos tropicales, destacando que el incremento sostenido de la temperatura puede afectar la productividad, la calidad del grano y la sostenibilidad de los agroecosistemas cafetaleros. Aunque los incrementos observados en la RCC son relativamente moderados, su acumulación a lo largo de varias décadas podría generar cambios importantes en la aptitud agroclimática regional y en la sostenibilidad de los sistemas cafetaleros tradicionales.

Se calcularon los promedios de las *t*ma para cada una de las estaciones. Con esta información, se confeccionó una nueva serie de *t*ma para cada una de las estaciones en estudio. Se observó un valor promedio de la *t*ma para la estación: SL (19,8 °C), AJS (22,4 °C), SB (21,2 °C), FB (22,8 °C) y RLG (23,2 °C); con una desviación estándar de 1,0 °C para la estación SL, 1,1 °C para AJS, 1,1 °C para SB; 1,1 °C para la estación FB y 1,2 °C para la estación RLG. La mediana fue de: 19,7 °C (SL), 22,4 °C (AJS), 21,1 °C (SB), 22,7 °C (FB) y 23,1 °C (RLG). Para determinar si las diferencias encontradas son significativas, se aplicó la prueba de contraste correspondiente y se encontró que estas diferencias sí son estadísticamente significativas $p < .001$, a continuación, se muestra cuáles fueron estas diferencias para cada una de las estaciones.

Estación Santa Lucía: La serie estudiada presentó un valor de asimetría ligeramente sesgado a la derecha y, además, un valor de curtosis positivo, aproximándose a una distribución leptocúrtica, es decir una distribución puntiaguda. Se determinó la variación anual de la temperatura del aire para el periodo 1983-2017. También se analizó la tendencia de las *t*ma en la estación SL. El ser positiva la pendiente de la línea de tendencia, indica que las *t*ma de la estación SL, tienden a aumentar a medida que han transcurrido los años.

Estación Aeropuerto Juan Santamaría: La serie estudiada presentó asimetría ligeramente sesgada a la derecha y, además, un valor de curtosis negativo, aproximándose a una distribución platicúrtica, es decir

una distribución achatada con baja concentración de datos en torno a la media. Se determinó la variación anual de la temperatura del aire para el periodo 1983-2017. También se analizó la tendencia de las tma en la estación AJS. El ser positiva la pendiente de la línea de tendencia, indica que las tma de la estación AJS, tienden a aumentar a medida que han transcurrido los años.

Estación Santa Bárbara: La serie estudiada presentó un valor de asimetría moderadamente sesgada a la derecha y, además, un valor de curtosis positivo, aproximándose a una distribución leptocúrtica, es decir una distribución puntiaguda con mayor concentración de datos en torno a la media. Se determinó la variación anual de la temperatura del aire para el periodo 1983-2017. También se analizó la tendencia de las tma en la estación SB. El ser positiva la pendiente de la línea de tendencia, indica que las tma de la estación SB, tienden a aumentar a medida que han transcurrido los años.

Estación Fabio Baudrit: La serie estudiada presentó un valor de asimetría moderadamente sesgado a la derecha y, además, un valor de curtosis negativo, aproximándose a una distribución platicúrtica, es decir una distribución achatada. Se determinó la variación anual de la temperatura del aire para el periodo 1983-2017. También se analizó la tendencia de tma en la estación FB. El ser positiva la pendiente de la línea de tendencia, indica que las tma de la estación FB, tienden a aumentar a medida que han transcurrido los años.

Estación RECOPE La Garita: La serie estudiada presentó un valor de asimetría moderadamente sesgado a la derecha y, además, un valor de curtosis positivo, aproximándose a una distribución leptocúrtica, es decir una distribución puntiaguda con mayor concentración de datos en torno a la media. Se determinó la variación anual de la temperatura del aire para el periodo 1983-2017. También se analizó la tendencia de las tma en la estación FB. El ser positiva la pendiente de la línea de tendencia, indica que las tma de la estación RLG, tienden a aumentar a medida que han transcurrido los años.

Síntesis de las tendencias térmicas observadas

Con el propósito de sintetizar la magnitud de los cambios observados en las variables térmicas analizadas, la Tabla 1 presenta las tasas de cambio estimadas para la temperatura máxima media, temperatura mínima media y temperatura media, tanto a escala regional como para cada una de las estaciones meteorológicas estudiadas. Los resultados evidencian una tendencia general al calentamiento en la Región Central de Costa Rica, aunque con diferencias importantes en la magnitud de los cambios entre localidades.

De manera general, las temperaturas máximas mostraron las mayores tasas de incremento, particularmente en las estaciones Fabio Baudrit y RECOPE La Garita, donde se registraron aumentos superiores a 0,70 °C década⁻¹. Las temperaturas mínimas presentaron una respuesta más variable entre estaciones, mientras que la temperatura media evidenció incrementos positivos en todas las localidades analizadas. Estos resultados confirman la existencia de un proceso de calentamiento regional, aunque modulado por condiciones locales asociadas a factores topográficos, altitudinales y de uso del suelo.

Comportamiento general de la amplitud térmica regional

La amplitud térmica, entendida como la diferencia entre la temperatura máxima media y la temperatura mínima media, constituye un indicador de relevancia agroclimática para la producción de café debido a su influencia sobre los procesos fisiológicos asociados con el crecimiento, desarrollo y calidad del grano.

Los resultados obtenidos evidencian que las temperaturas máximas presentaron tasas de incremento superiores a las observadas para las temperaturas mínimas en la mayoría de las estaciones meteorológicas analizadas. A escala regional, la temperatura máxima media aumentó aproximadamente 0,14 °C década⁻¹, mientras que la temperatura mínima media presentó un incremento de 0,06 °C década⁻¹. Este comportamiento sugiere una tendencia hacia el aumento de la amplitud térmica regional durante el período de estudio.

Las diferencias observadas entre las tasas de

Tabla 1. Tasas de cambio de la temperatura máxima, mínima y media en la Región Central de Costa Rica y en las estaciones meteorológicas analizadas durante el período de estudio.

Variable	RCC	SL	AJS	SB	FB	RLG
Temperatura máxima media (°C década ⁻¹)	0,14	0,33	0,02	0,13	0,73	0,77
Temperatura mínima media (°C década ⁻¹)	0,06	0,22	0,02	0,10	-0,18	0,23
Temperatura media (°C década ⁻¹)	0,10	0,46	0,06	0,12	0,28	0,42

Nota: Los valores representan tasas de cambio estimadas mediante análisis complementario de tendencia lineal. Valores positivos indican calentamiento y valores negativos indican una disminución relativa durante el período analizado.

calentamiento diurno y nocturno podrían generar modificaciones graduales en las condiciones agroclimáticas que caracterizan la producción de café en la RCC, particularmente en relación con los procesos de maduración del fruto, acumulación de azúcares y calidad final del grano.

Implicaciones agroclimáticas de la amplitud térmica para el cultivo de café

La amplitud térmica constituye uno de los indicadores climáticos de mayor relevancia para la producción y calidad del café. En términos fisiológicos, la diferencia entre las temperaturas diurnas y nocturnas influye directamente sobre procesos asociados con la fotosíntesis, la respiración, la acumulación de carbohidratos y el llenado del fruto. En zonas cafetaleras de montaña, amplitudes térmicas moderadas favorecen una maduración más lenta de las cerezas, permitiendo una mayor acumulación de azúcares y compuestos aromáticos, lo que generalmente se traduce en una mejor calidad física y sensorial del grano.

Por el contrario, cuando las temperaturas nocturnas aumentan de manera sostenida, la amplitud térmica tiende a reducirse, incrementando la respiración de mantenimiento de las plantas y disminuyendo la cantidad de fotoasimilados disponibles para el desarrollo del fruto. Este fenómeno puede afectar negativamente el peso del grano, la densidad, la composición química y algunas características organolépticas asociadas a cafés de alta calidad.

Las diferencias observadas entre estaciones meteorológicas reflejan la influencia de factores como la altitud y las condiciones locales del paisaje sobre el comportamiento térmico regional. Las localidades ubicadas a mayor altitud, como Santa Lucía y Santa Bárbara, presentaron temperaturas medias inferiores respecto a las estaciones localizadas en sectores más bajos de la Región Central, condición que históricamente ha favorecido la producción de cafés de mejor calidad. Sin embargo, las tendencias positivas observadas en las temperaturas máximas, mínimas y medias sugieren una modificación gradual de las condiciones agroclimáticas que tradicionalmente han caracterizado estas zonas productoras.

Desde una perspectiva de adaptación al cambio climático, los resultados obtenidos evidencian la necesidad de fortalecer estrategias de manejo orientadas a conservar condiciones microclimáticas favorables dentro de los cafetales. Entre ellas destacan el uso de sistemas agroforestales con sombra regulada, la conservación de cobertura vegetal, el manejo adecuado del recurso hídrico y la selección de materiales genéticos con mayor tolerancia al estrés térmico. Asimismo, los resultados sugieren que las zonas cafetaleras ubicadas a mayores

altitudes podrían adquirir una importancia creciente en las próximas décadas, conforme continúe el incremento de las temperaturas observado en la RCC. Las tendencias observadas coinciden con estudios que proyectan un desplazamiento progresivo de las zonas climáticamente aptas para *Coffea arabica* hacia mayores elevaciones como consecuencia del incremento de las temperaturas (Ovalle-Rivera et al., 2015; Abigaba et al., 2024). Dicho proceso podría modificar la distribución espacial de la caficultura en regiones montañosas y aumentar la importancia productiva de zonas actualmente ubicadas en los límites superiores de aptitud climática. Asimismo, Abigaba et al. (2024) destacan que los sistemas agroforestales pueden desempeñar un papel fundamental en la mitigación de los efectos del calentamiento sobre la aptitud climática del cultivo, al contribuir a la regulación térmica y a la conservación de condiciones ambientales más favorables para la producción sostenible de café.

Implicaciones para la adaptación y la planificación del sector cafetalero

Los resultados obtenidos evidencian un incremento significativo de las temperaturas máximas, mínimas y medias en la RCC, así como diferencias espaciales en la magnitud de dichos cambios. Estas tendencias sugieren la necesidad de fortalecer estrategias de adaptación orientadas a reducir la vulnerabilidad de los sistemas cafetaleros ante condiciones térmicas progresivamente más cálidas.

A nivel de finca, los productores podrían implementar medidas destinadas a mejorar la regulación microclimática de los cafetales, entre ellas el establecimiento y manejo adecuado de sistemas agroforestales con sombra, la conservación de cobertura vegetal permanente, el uso eficiente del recurso hídrico y la incorporación de prácticas de conservación de suelo y agua. Estas estrategias contribuyen a disminuir el estrés térmico, mejorar la eficiencia en el uso del agua y aumentar la resiliencia de los sistemas productivos frente a la variabilidad climática.

Asimismo, los resultados obtenidos resaltan la importancia de promover programas de investigación y mejoramiento genético orientados a la selección de materiales con mayor tolerancia a temperaturas elevadas y condiciones de estrés hídrico. La identificación de variedades adaptadas a escenarios climáticos futuros podría convertirse en una herramienta fundamental para mantener la productividad y calidad del café en la Región Central.

Desde la perspectiva de la planificación territorial y las políticas públicas, las tendencias observadas sugieren la necesidad de fortalecer los sistemas de monitoreo agroclimático, desarrollar programas de alerta temprana y considerar la variable climática dentro de los procesos de

ordenamiento productivo regional. Además, la información generada puede servir como insumo para la formulación de estrategias nacionales y regionales de adaptación al cambio climático orientadas al sector cafetalero.

Finalmente, los resultados de esta investigación constituyen una línea base para futuros estudios relacionados con la modelación climática, la evaluación de escenarios de cambio climático y el análisis de la respuesta productiva del café ante modificaciones en las condiciones térmicas de la RCC.

Limitaciones del estudio

Los resultados obtenidos deben interpretarse considerando algunas limitaciones inherentes a la disponibilidad y naturaleza de la información analizada. Las tendencias fueron evaluadas a partir de registros meteorológicos históricos observados y, por tanto, no incluyen simulaciones de escenarios climáticos futuros que permitan proyectar la evolución de las condiciones térmicas en la RCC. Asimismo, las estaciones meteorológicas utilizadas presentan diferencias en la longitud de las series disponibles y en la cantidad de datos faltantes, situación que podría influir parcialmente en la magnitud de las tendencias estimadas. No obstante, la consistencia de los resultados observados entre estaciones y a escala regional aporta evidencia robusta sobre la existencia de un proceso de calentamiento térmico en la región estudiada.

Conclusiones

La RCC presentó un incremento significativo de las temperaturas máximas, mínimas y medias durante el período analizado, evidenciando un proceso sostenido de calentamiento regional. Las temperaturas máximas mostraron las mayores tasas de cambio, con incrementos estimados de aproximadamente $0,14\text{ }^{\circ}\text{C}\text{ década}^{-1}$ para la temperatura máxima media regional y $0,47\text{ }^{\circ}\text{C}\text{ década}^{-1}$ para la temperatura máxima absoluta regional.

Las tendencias observadas no fueron homogéneas entre estaciones meteorológicas. Las mayores tasas de calentamiento se registraron en las estaciones Fabio Baudrit y RECOPE La Garita, mientras que Santa Lucía presentó incrementos moderados y las estaciones Santa Bárbara y Aeropuerto Internacional Juan Santamaría mostraron cambios de menor magnitud. Estos resultados evidencian una marcada variabilidad espacial del comportamiento térmico en la Región Central, asociada posiblemente a diferencias de altitud, condiciones topográficas, cambios en el uso del suelo y características microclimáticas locales.

El incremento simultáneo de las temperaturas máximas, mínimas y medias sugiere una modificación

gradual de las condiciones agroclimáticas que históricamente han caracterizado la producción de café en la RCC. Particularmente, el aumento de las temperaturas máximas del aire puede incrementar el estrés térmico durante las horas diurnas, mientras que el incremento de las temperaturas mínimas puede elevar las tasas de respiración nocturna de las plantas. En conjunto, estos cambios podrían afectar procesos fisiológicos relacionados con la floración, el llenado del fruto, la acumulación de biomasa y la calidad física y sensorial del grano de café.

La amplitud térmica constituye un elemento agroclimático de gran relevancia para la caficultura regional. Las diferencias térmicas entre el día y la noche favorecen condiciones asociadas con una maduración más lenta del fruto y una mayor acumulación de compuestos de interés para la calidad del café. En este contexto, los cambios observados en el régimen térmico podrían modificar progresivamente la aptitud agroclimática de algunas zonas productoras, especialmente aquellas ubicadas a menores altitudes.

Los resultados obtenidos resaltan la necesidad de fortalecer estrategias de adaptación climática en los sistemas cafetaleros de la RCC, incluyendo el manejo adecuado de sombra, la conservación de cobertura vegetal, el uso eficiente del recurso hídrico, el mejoramiento genético orientado a tolerancia térmica y el fortalecimiento de los sistemas de monitoreo agroclimático. Asimismo, la información generada constituye una línea base para futuras investigaciones orientadas a evaluar los impactos del cambio climático sobre la productividad y calidad del café en Costa Rica.

Contribución de los autores

J. R. FLORES: concepción y diseño de la investigación, formulación del problema de estudio, recopilación, depuración y procesamiento de la información meteorológica, análisis estadístico, análisis climatológico y agroclimático, interpretación de resultados, elaboración de tablas y figuras, redacción del manuscrito y atención de observaciones derivadas del proceso de revisión.

I. C. D. MONGE: apoyo en el análisis e interpretación de resultados, revisión crítica del manuscrito, revisión de contenido científico y revisión final del documento.

Referencias

- ABIGABA, D.; CHEMURA, A.; GORNOTT, C.; SCHAUBERGER, B. The potential of agroforestry to buffer climate change impacts on suitability of coffee and banana in Uganda. *Agroforestry Systems*, Dordrecht, v.98, n.6, p.1555-1577, 2024. DOI: 10.1007/s10457-024-01025-3
- AHMED, S.; BRINKLEY, S.; SMITH, E.; SELA, A.; THEISEN, M. Climate Change and Coffee Quality: Systematic Review on the Effects of Environmental and Management Variation on Secondary Metabolites and Sensory Attributes of *Coffea arabica* and *Coffea canephora*.

Frontiers in Plant Science, Lausana, v.12, 708013. 2021. DOI: 10.3389/fpls.2021.708013

ARNFIELD, A. J. Köppen climate classification. In: **ENCYCLOPEDIA Britannica**. [S. l.], 2025. Available at: <<https://www.britannica.com/science/Koppen-climate-classification>>. Accessed on: Mar. 14 2025.

BALTAZAR-DA SILVA, D. F.; MOREJÓN-GARCÍA, M.; DÍAZ-PITA, A.; DE ALMEIDA, F. M.; DA COSTA-NETA, J. F.; GONÇALVES, V. Caracterización agroclimática de la provincia Uigé, Angola en función del desarrollo del Café Robusta. **Cultivos Tropicales**, San José de las Lajas, v.41, n.1, e01, 2020.

COSTA RICA. Ministerio de Ambiente y Energía. **Cuarta Comunicación Nacional a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático**: Costa Rica. Edición: Yazmín Montoya Jiménez. 1. ed. San José: MINAE, 2021. 283 p.

FARAZ, M.; MEREU, V.; SPANO, D.; TRABUCCO, A.; MARRAS, S.; EL CHAMI, D. A systematic review of analytical and modelling tools to assess climate change impacts and adaptation on coffee agrosystems. **Sustainability**, v.15, n.19, 14582, 2023. DOI: 10.3390/su151914582

FLORES SILVA, E. **Geografía de Costa Rica**. 3. ed. San José: EUNED, 1991.

GORGAS, J.; CARDIEL, N.; ZAMORANO, J. **Estadística básica para estudiantes de ciencias**. Madrid: Universidad Complutense de Madrid, 2011.

IBM CORP. IBM SPSS Statistics for Windows. Versión 30.0. Armonk, NY: IBM Corp., 2024.

IMN. Instituto Meteorológico Nacional. **Clima en Costa Rica**: El clima y las regiones climáticas de Costa Rica. Available at: <<http://www.imn.ac.cr/documents/10179/31165/clima-regiones-climat.pdf/cb3b55c3-f358-495a-b66c-90e677e35f57>>. Accessed on: Feb. 20 2025.

JIMÉNEZ, F. **Elementos de Agroclimatología**. Turrialba: CATIE, 1985. 33 p.

MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. **Applied statistics and probability for engineers**. 5. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2010.

MURPHY, G.; HURTADO, R. **Agrometeorología**. Buenos Aires: Editorial Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires, 2016.

OLIVARES, B. O.; HERNÁNDEZ, R.; ARIAS, A.; MOLINA, J. C.; PEREIRA, Y. Zonificación agroclimática del cultivo de maíz para la sostenibilidad de la producción agrícola en Carabobo, Venezuela. **Revista Universitaria de Geografía**, Bahía Blanca, v.27, n.2, p.135-156, 2018.

OVALLE-RIVERA, O.; LÄDERACH, P.; BUNN, C.; OBERSTEINER, M.; SCHROTH, G. Projected shifts in *Coffea arabica* suitability among major global producing regions due to climate change. **PLoS ONE**, [S. l.], v.10, n.4, e0124155, 2015. DOI: 10.1371/journal.pone.0124155

RENTERÍA-CHIMBO, A. E.; ROMERO-GUERRA, D. P.; DÁVILA-ULLOA, M.; ROMERO RUIZ, S. L. Optimización agroindustrial mediante la adaptación genética de *Coffea arabica* y *Coffea canephora* a las condiciones climáticas de la Amazonía ecuatoriana: Estudio de Caso en Arosemena Tola, Napo. **Green World Journal**, [S. l.], v.7, n.1, 2024. DOI: 10.53313/gwj710101

WILKS, D. S. **Statistical methods in the atmospheric sciences**. 3. ed. Oxford: Academic Press, 2011. 676 p. (International Geophysics Series, v. 100).

WMO. World Meteorological Organization. Guidelines on Surface Station Data Quality Control and Quality Assurance for Climate Applications: 2021 edition. Geneva: WMO, 2021. 54 p. (WMO-No. 1269).

CITACIÓN	ROSALES FLORES, J.; DELGADO MONGE, I. C. Tendencias de la temperatura del aire y la amplitud térmica en la Región Central de Costa Rica: implicaciones agroclimáticas para el cultivo de café. Agrometeoros , Passo Fundo, v. 33-34, e027992, 2026.
----------	--



Air temperature trends and the diurnal temperature range in the Central Region of Costa Rica: Agroclimatic implications for coffee cultivation

Johaner Rosales Flores^{1(*)} y Islande Cristina Delgado Monge²

¹Escuela de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional, Heredia, Costa Rica. E-mail: johaner@una.cr

²Escuela de Matemática, Universidad Nacional, Heredia, Costa Rica. E-mail: islande.delgado.monge@una.cr

(*)Autor para correspondencia.

ARTICLE INFO

Article history:

Received 23 July 2025

Accepted 18 June 2026

Index terms:

climate change

air temperature trends

agroclimatology

coffee cultivation

diurnal temperature range

Coffea arabica

Costa Rica

ABSTRACT

The magnitude and spatial variability of thermal trends in the Central Region of Costa Rica have been poorly documented despite the agroclimatic and historical importance of this area for the country's coffee cultivation. This study aimed to analyze trends in air temperature and the diurnal temperature range (DTR), as well as their agroclimatic implications for coffee cultivation. Historical records of maximum, minimum, and mean air temperature from five meteorological stations covering the 1982–2017 period were analyzed after applying quality control, descriptive statistics, and trend analysis. Significant increases were identified in maximum, minimum, and mean temperatures. At the regional scale, mean maximum temperature increased by 0.14 °C decade⁻¹, whereas absolute maximum temperature increased by 0.47 °C decade⁻¹. Mean minimum temperature and mean air temperature increased by 0.06 and 0.10 °C decade⁻¹, respectively. The highest warming rates were recorded at the Fabio Baudrit and RECOPE La Garita stations, confirming the spatial variability of warming patterns. The results suggest gradual changes in agroclimatic conditions and in the regional diurnal temperature range, with potential implications for crop agroclimatic suitability, bean quality, and the development of adaptation and agroclimatic planning strategies for the Costa Rican coffee sector.

© 2026 SBAgro. Todos os direitos reservados.

CITATION

ROSALLES FLORES, J.; DELGADO MONGE, I. C. Tendencias de la temperatura del aire y la amplitud térmica en la Región Central de Costa Rica: implicaciones agroclimáticas para el cultivo de café. *Agrometeoros*, Passo Fundo, v.33-34.e027992, 2026.