

Estado del Clima, Región Metropolitana de Guatemala

REPORTE CIENTIFICO

Rosito Juan Carlos¹, Pérez Silvia Paola^{1,2,5}, Cosseman David¹

DOI

Key Points

- **Temperatura máxima > p90** (TX90p): ↑ y **Temperatura máxima < p10** (TX10p): ↓ señal de calentamiento robusto.
- **Precipitación total** (PRCPTOT): sin tendencia uniforme; ↑
- **Lluvias muy/extremadamente húmedas** (R95pTOT/R99pTOT): ↑
- **Máximo de precipitación en 1 día / en 5 días consecutivos**: (RX1day y RX5day), concentrando la lluvia en pulsos más severos. ↑

Correspondencia a:

ibiosferadatasc@gmail.com

Edición técnica:

Silvia Paola Pérez Cruz

¹Instituto Biosfera, ²World Wildlife Fund, ³Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología, Ciudad de Guatemala, Guatemala, ⁴Instituto Nacional de Electrificación, Ciudad de Guatemala, Guatemala ⁵Facultad de Agronomía, Universidad de San Carlos de Guatemala, Ciudad de Guatemala, Guatemala.

Abstract This report provides critical climate information to support urban risk management, climate change adaptation, and water security in the Guatemala Metropolitan Area. Building on a systematic analysis of historical temperature and precipitation records from representative stations (INSIVUMEH, San Pedro Ayampuc, Suiza Contenta, among others), it assesses long-term trends and climate extremes indices defined under ETCCDI standards. This integrated metropolitan-scale approach is unusual in the region and enables a direct linkage between the observed climate signal and urbanization processes, land-use change, and pressure on water resources.

The results show significant near-surface air warming, particularly at higher-altitude peri-urban stations (e.g., Suiza Contenta), where the frequency of warm days increases and maximum temperatures intensify. By contrast, at the central urban station (INSIVUMEH), warming affects both daytime and nighttime conditions.

In parallel, no sustained trend is observed in total annual rainfall; however, precipitation shows a marked increase in concentration during intense events. The fraction of annual rainfall contributed by very wet days (above the 95th percentile) and extremely wet days (>99th percentile) increases, alongside rises in annual maximum 1-day precipitation (RX1day) and 5-day precipitation totals (RX5day). This pattern suggests a warmer urban-metropolitan climate with more extreme rainfall bursts, posing growing challenges for territorial planning.

Overall, these findings indicate the need to strengthen stormwater drainage management, land-use planning, and the conservation of water sources in the face of a climate regime that is already showing signs of change.

Resumen Este informe aporta información climática crucial para la gestión de riesgos urbanos, la adaptación al cambio climático y la seguridad hídrica en el Área Metropolitana de Guatemala. A partir del análisis sistemático de series históricas de temperatura y precipitación de estaciones representativas (INSIVUMEH, San Pedro Ayampuc, Suiza Contenta, entre otras), se evalúan tendencias de largo plazo e índices climáticos extremos definidos según los estándares ETCCDI. Este enfoque integrado a escala metropolitana es inusual en la región y permite vincular

directamente la señal climática con procesos de urbanización, ocupación del territorio y presión sobre el recurso hídrico.

Los resultados evidencian un calentamiento significativo del aire, especialmente en estaciones periurbanas de mayor altitud (por ejemplo, Suiza Contenta), donde aumenta la frecuencia de días cálidos y se intensifican las temperaturas máximas, mientras que en la estación urbana central (INSIVUMEH) el calentamiento abarca tanto el día como la noche.

Paralelamente, no se observa una tendencia sostenida en el total anual de lluvia, pero sí un aumento notable en la concentración de la precipitación en eventos intensos: crece la fracción de la lluvia anual aportada por episodios muy húmedos (por encima del percentil 95) y extremadamente húmedos (>p99), junto con incrementos en los máximos de precipitación diaria (RX1day) y multidiaria (RX5day). Este patrón sugiere un clima urbano-metropolitano más cálido y con pulsos de lluvia más extremos, lo que supone desafíos crecientes para la planificación territorial.

En conjunto, los hallazgos indican la necesidad de fortalecer estrategias de manejo de drenajes pluviales, ordenamiento territorial y conservación de fuentes de agua frente a un régimen climático que ya muestra señales de cambio.

1. Introducción

El objetivo de este estudio es **caracterizar la climatología** de la Región Metropolitana de Guatemala mediante el análisis histórico de variables climáticas (temperatura máxima, mínima y precipitación) registradas en estaciones representativas del entorno urbano y periurbano. Se busca identificar tendencias, variaciones e indicios de cambio climático en un área de alta concentración poblacional y económica. Esta región (que aporta más del 50% del PIB nacional) enfrenta presiones ambientales particulares derivadas de la urbanización, incluyendo el efecto de **isla de calor urbana**, variabilidad hídrica acentuada y vulnerabilidad frente a eventos extremos.

La presión sobre el recurso hídrico en el Área Metropolitana de Guatemala es particularmente crítica. El abastecimiento urbano depende casi exclusivamente de agua subterránea: alrededor del 90–91 % del consumo total proviene del acuífero metropolitano (IARNA-URL & The Nature Conservancy, 2012).

Estudios técnicos recientes estiman que este acuífero opera actualmente con un déficit promedio anual de 360 millones de metros cúbicos, evidenciando una sobreextracción sostenida respecto de su capacidad de recarga (EMPAGUA, 2024).

Este desequilibrio se manifiesta en descensos documentados del nivel freático en sectores del valle, reflejados en diagnósticos hidrogeológicos que reportan abatimientos interanuales significativos en pozos de abastecimiento urbano (Samayoa, 2013; Celada et al., 2020). Paralelamente, los cuerpos de agua superficiales —ríos, tributarios y el lago de Amatitlán— muestran deterioro severo en calidad y caudales, lo que ha desplazado aún más la presión hacia el acuífero.

Adicionalmente, se considera importante mencionar cuatro factores moduladores que podrían condicionar la señal climática local; estos se abordan de manera integrada y conceptual, ya que, aunque han sido estudiados individualmente, se considera para el presente estudio que su combinación influye de forma complementaria en los patrones térmicos y pluviométricos del área metropolitana de Guatemala:

- **Variabilidad oceánica (ENSO)** – El fenómeno El Niño/Oscilación del Sur modula el transporte de humedad hacia Centroamérica a través del chorro de bajos niveles del Caribe. Durante El Niño suele disminuir la lluvia en la región, mientras que La Niña favorece excesos y eventos extremos. Estos patrones han sido documentados en estudios regionales (e.g., Durán-Quesada *et al.*, 2017; Magaña *et al.*, 1999).
- **Teleconexión del Atlántico Norte Tropical (ATN)**: la temperatura superficial del mar en el Atlántico Norte Tropical modula la lluvia en Centroamérica. Fases cálidas del ATN favorecen estaciones lluviosas más intensas y prolongadas, mientras que fases frías se asocian con déficits. La interacción entre ATN y ENSO potencia extremos de lluvia o sequía, según su combinación (Wang & Enfield, 2001).
- **Urbanización (Isla de calor urbana)** – La expansión urbana eleva la temperatura del aire y de la superficie. Mediciones locales muestran que parques urbanos en la Ciudad de Guatemala mantienen temperaturas del aire **≈2.0–3.5 °C más bajas** que las zonas asfaltadas circundantes; esta diferencia confirma la atenuación que proporcionan las áreas verdes (LS3 USAC, 2013) y es consistente con guías internacionales de mitigación del efecto de calor urbano (por ejemplo, estrategias de la EPA, 2025).
- **Orografía compleja** – La ciudad se ubica en el Altiplano Central de Guatemala, una región montañosa (Sierra Madre) con altitudes de 1,000–4,000 m s.n.m. y valles tectónicos (el Valle de Guatemala es un graben dentro de esta provincia volcánica). La disposición de cordilleras y valles genera fuertes gradientes espaciales de precipitación (mayor al sotavento del Caribe, menor hacia el Pacífico) y modula fenómenos estacionales como la **canícula**. Estudios locales sugieren que cambios en la topografía pueden alterar la duración e intensidad de la canícula (Batz, 2023).

En este contexto, contar con una **caracterización climática detallada** y técnicamente fundamentada, basada en registros históricos de estaciones meteorológicas estratégicas (como INSIVUMEH, Suiza Contenta, Guatemala Sur, etc.), es vital. Esta información permite comprender las dinámicas atmosféricas locales y sirve de insumo para la **planificación urbana, gestión de riesgos, protección del recurso hídrico y adaptación al cambio climático**. Asimismo, orienta la formulación de políticas públicas ambientales sostenibles. El presente estudio aporta evidencia científica para guiar acciones territoriales en un área de alta

relevancia nacional, donde la presión sobre los recursos naturales –en particular el agua– exige respuestas técnicas urgentes.

2. Datos y Métodos

Área de estudio y datos: La cuenca del río Villalobos abarca gran parte del Área Metropolitana de Guatemala, incluyendo sectores urbanos centrales y periferias montañosas. Se identificaron las estaciones meteorológicas dentro de esta región con series de tiempo suficientemente largas (≥ 30 años) y datos de calidad para precipitación y temperatura (Tabla 1).

La **Organización Meteorológica Mundial (OMM)** define las *normales climatológicas* como promedios de **30 años**, actualizados por década, lo cual provee una línea base estable para describir el estado medio del clima; con esta base, se priorizaron estaciones con registros extensos que abarcan varias décadas. Se seleccionaron tres estaciones principales: la estación central INSIVUMEH (ciudad de Guatemala, ~1500 m), la estación San Pedro Ayampuc (1290 m) y la estación Suiza Contenta (periferia occidental alta, San Lucas Sacatepéquez, ~2100 m) (**Figura 1**). Estas cubren el periodo 1970–2024 con datos diarios de precipitación, temperatura máxima (Tmax) y mínima (Tmin).

Adicionalmente, se incorporaron las estaciones Compuertas Amatitlán y Guatemala Sur para enriquecer el análisis pluviométrico espacial, particularmente para la elaboración de mapas de precipitación promedio del periodo 1990–2024. Aunque estas estaciones no cuentan con registros climáticos de periodos anteriores, su inclusión es relevante para caracterizar el gradiente espacial de lluvia dentro del Área Metropolitana de Guatemala, especialmente en las zonas sur y suroeste donde influye la topografía del valle y la cercanía al lago de Amatitlán.

Previo al análisis, todas las series fueron sometidas a controles básicos de calidad (revisión de valores atípicos, consistencia mensual y comparación con estaciones vecinas), y los promedios interanuales resultantes se utilizaron para la interpolación espacial mediante el método de ponderación inversa de la distancia (IDW), con el fin de representar de manera continua los patrones medios de precipitación en la región.

Asimismo, se aplicó el **método de interpolación IDW** para la elaboración de los mapas de tendencias de índices climáticos extremos (PRCPTOT, R95pTOT, RX5day, SDII, TX90p, TX10p, DTR y TN90p). Para estos productos se utilizaron las estaciones con series adecuadas: INSIVUMEH y Suiza Contenta (1970–2024), y Guatemala Sur (1991–2024), lo que permitió generar superficies espaciales de tendencia que representan de manera coherente la distribución del cambio climático local dentro del Área Metropolitana de Guatemala.

La elección del método IDW responde a su estabilidad y buen desempeño en contextos con baja densidad y distribución heterogénea de estaciones meteorológicas. A diferencia de métodos geoestadísticos más complejos, IDW no requiere suponer un modelo de variabilidad espacial y preserva mejor los valores

observados en territorios con topografía compleja, como el área metropolitana (Burrough & McDonnell, 1998). Por ello, constituye la opción más adecuada para representar patrones y tendencias climáticas en la región.

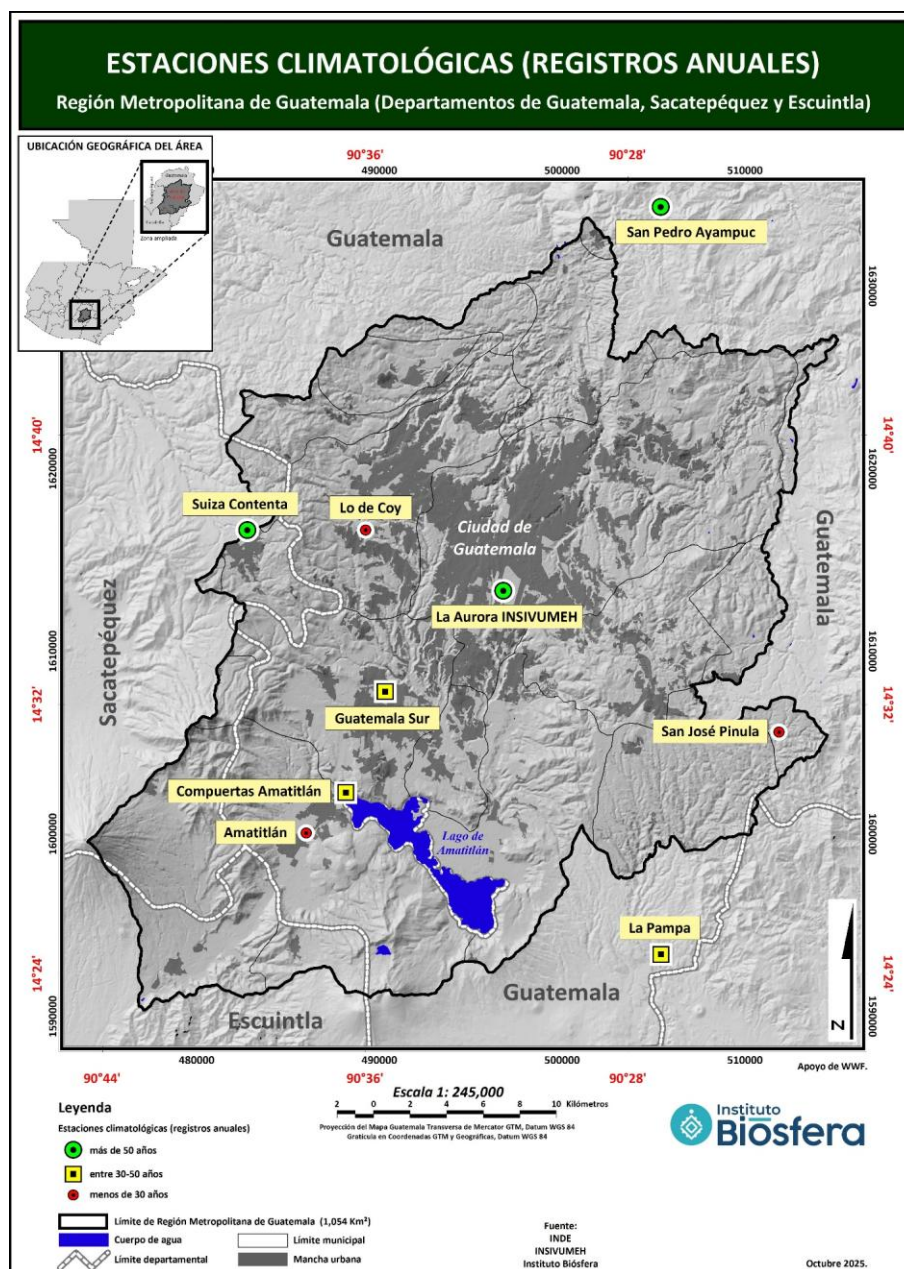


Figura 1. Ubicación de las estaciones climatológicas analizadas en la Región Metropolitana de Guatemala.

Fuente: Instituto Biosfera (2025), con base en registros de INSIVUMEH e INDE.

Índices climáticos extremos: Para cuantificar tendencias y variabilidad en extremos climáticos, se calcularon índices recomendados por el *Expert Team on Climate Change Detection and Indices* (ETCCDI, OMM). En total se analizaron 27 índices estándares (ETCCDI, 2009); a continuación, se resumen algunos utilizados, con su interpretación:

- **PRCPTOT** – Precipitación total anual en días húmedos (≥ 1 mm). Indica si un año fue globalmente más húmedo o seco.
- **RX1day / RX5day** – Máximo de precipitación en 1 día / en 5 días consecutivos. Señalan eventos de lluvia extrema de corta duración y de periodos multi-día, respectivamente, críticos para inundaciones repentinas y deslizamientos.
- **R95pTOT / R99pTOT** – Total anual de precipitación en días muy húmedos ($>$ percentil 95) y extremadamente húmedos ($>$ p99) del periodo base. Miden la *concentración de la lluvia en eventos intensos*.
- **SDII** – Índice simple de intensidad de precipitación (mm/día húmedo). Refleja la intensidad media de la lluvia cuando llueve.
- **CDD / CWD** – Duración de la racha más larga de días secos (Consecutive Dry Days) y de días húmedos (Consecutive Wet Days). Relacionados con sequías meteorológicas (CDD) y periodos lluviosos prolongados (CWD) que saturan suelos.
- **TX90p / TX10p** – Porcentaje de días cálidos ($T_{max} > p90$) y días fríos ($T_{max} < p10$) del periodo base. Miden la frecuencia de extremos cálidos y fríos diurnos.
- **TN90p / TN10p** – Porcentaje de noches cálidas ($T_{min} > p90$) y noches frías ($T_{min} < p10$). Indican extremos térmicos nocturnos.
- **WSDI / CSDI** – Duración de olas de calor (Warm Spell Duration Index: número de días en rachas ≥ 6 días con $T_{max} > p90$) y de olas de frío (Cold Spell Duration Index: rachas ≥ 6 días con $T_{min} < p10$).
- **TXx / TNn** – Temperatura máxima más alta del año, y temperatura mínima más baja del año, respectivamente. Representan extremos absolutos de calor diurno y frío nocturno.
- **SU25 / TR20** – Número de “días de verano” (Summer Days, $T_{max} > 25$ °C) y de “noches tropicales” (Tropical Nights, $T_{min} > 20$ °C), indicadores relevantes en clima urbano.
- **DTR** – Rango diurno de temperatura (Diurnal Temperature Range): diferencia entre la temperatura máxima (T_{max}) y la temperatura mínima (T_{min}) del día. Indica la amplitud térmica diaria y describe cuán marcada es la variación entre el calentamiento diurno y el enfriamiento nocturno.

Tabla 1. Estaciones meteorológicas principales analizadas en el Área Metropolitana de Guatemala (cuenca del Villalobos). Se indican sus registros disponibles (años), variables medidas y observaciones.

Estación (Municipio)	Periodo de datos	Años de datos	PP	T. Máx	T. Mín	Observaciones de calidad
INSIVUMEH (Guatemala)	1926–2024 (analizado 1970–2024)	~99	✓	✓	✓	Serie larga y continua (referencia urbana principal).
San Pedro Ayampuc (San Pedro Ayampuc)	1970–2024	~54	✓	✓	✓	Serie larga, algunos datos faltantes antes de 1980.
Suiza Contenta (San Lucas Sacatepéquez)	1970–2024	~54	✓	✓	✓	Serie larga en periferia alta; buena calidad general.
Compuertas Amatitlán (Amatitlán)	1978–2024	~46	✓	–	–	Solo precipitación; complementa cobertura sur.
Guatemala Sur (Villa Nueva)	1991–2024	~33	✓	✓	✓	Serie intermedia; utilizada comparativamente.

Nota: “✓” indica variable disponible. Temp. = Temperatura.

Análisis estadístico: Los índices anuales se calcularon con la herramienta **ClimPACT2/CLIMDEX** en lenguaje R, que aplica definiciones ETCCDI uniformes. Para detectar tendencias temporales se utilizó la prueba no paramétrica de Mann-Kendall con cálculo de pendiente de Sen para la magnitud del cambio anual. Se consideró significancia estadística al nivel $p < 0.05$ (95% de confianza). Adicionalmente, se inspeccionaron las series mensuales para evaluar cambios estacionales (p.ej. cambios en la distribución intraanual de lluvia, o desplazamientos

en fechas de extremos anuales). Los resultados se presentan mediante gráficas de series de tiempo con sus rectas de tendencia.

3. Resultados y discusión

3.1 Tendencias de temperatura y extremos térmicos. Periodo 1970–2024

El análisis conjunto de las estaciones INSIVUMEH, Suiza Contenta y San Pedro Ayampuc confirma un proceso de calentamiento sostenido en el Área Metropolitana de Guatemala. Considerando todo el periodo analizado (1970–2024), la temperatura media anual ha aumentado aproximadamente **+1.2 °C**, lo que refleja un cambio térmico consistente y estadísticamente significativo a escala regional, en concordancia con la señal reportada para Centroamérica (Aguilar et al., 2005; IPCC, 2021).

La estación Suiza Contenta, ubicada en un ambiente perimontano alto (~2100 m), muestra un **calentamiento diurno muy marcado**. El porcentaje de días extremadamente cálidos (TX90p) aumenta alrededor de **+2.2 % por década**, mientras que los días fríos (TX10p) se reducen cerca de **–14.9 % por década**, evidenciando una desaparición acelerada de jornadas frescas (**Figura 2**). La temperatura máxima absoluta (TXx) se incrementa aproximadamente **+0.54 °C por década** y el rango diurno de temperatura (DTR) aumenta en torno a **+0.93 °C por década**, lo que confirma que el calentamiento se concentra principalmente durante el día. En contraste, no se observa una tendencia estadísticamente significativa en los extremos térmicos nocturnos (TN90p, TN10p), lo cual es consistente con su ubicación periférica, la mayor altitud y la presencia de cobertura vegetal, factores que atenúan el efecto de isla de calor durante la noche (LS3-USAC, 2013).

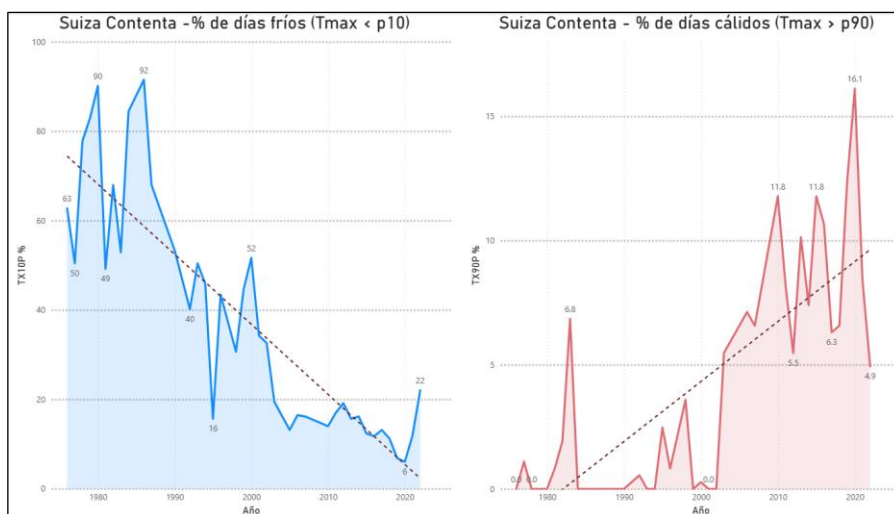


Figura 2. Tendencias de días fríos (TX10p) y días cálidos (TX90p) en la estación Suiza Contenta (1970–2024).

Fuente: Instituto Biósfera (2025), con base en registros de INSIVUMEH e INDE.

La disminución sostenida de TX10p y el incremento de TX90p evidencian un calentamiento diurno progresivo.

En contraste, en la estación INSIVUMEH, situada en el núcleo urbano (~1500 m), el calentamiento afecta tanto las **temperaturas máximas como las mínimas**. Considerando el periodo 1970–2024, los días extremadamente calurosos (TX90p) aumentan cerca de **+3.1 % por década**, mientras que los días fríos (TX10p) disminuyen aproximadamente **–2.0 % por década** ($p < 0.001$). De forma simultánea, las noches cálidas (TN90p) crecen alrededor de **+3.9 % por década**, y las noches frías (TN10p) se reducen en torno a **–2.4 % por década** ($p < 0.001$).

Este patrón, con incrementos paralelos en extremos diurnos y nocturnos, es coherente con el efecto de isla de calor urbano ampliamente documentado en ciudades tropicales de altura (Stewart & Oke, 2012). Aunque el rango diurno (DTR) no muestra cambios estadísticamente significativos, se observa un aumento reciente en la ocurrencia de noches tropicales (TR20): inexistentes antes de 2008, pero con entre 1 y 5 noches por año desde 2010, lo que sugiere un **cambio estructural en la climatología nocturna urbana**.

Si se amplía la ventana temporal al periodo 1941–2024, la temperatura media anual muestra un aumento acumulado cercano a **+1.2 °C**, resultado del calentamiento gradual registrado a lo largo de más de ocho décadas. Sin embargo, lo más relevante es que ese mismo incremento —aproximadamente +1.2 °C— ya ocurre únicamente dentro del periodo 1970–2024, lo que evidencia una aceleración marcada del calentamiento en las últimas cinco décadas, sugiriendo que el cambio térmico reciente es más rápido, intenso y significativo.

La estación **San Pedro Ayampuc**, aunque presenta mayor variabilidad interanual y brechas en décadas tempranas, muestra señales cualitativas de calentamiento consistente con las otras estaciones, especialmente una disminución marcada de noches frías en el periodo reciente. Aunque varios índices no alcanzan significancia estadística, ello se atribuye principalmente a la calidad de la serie. En conjunto, las tres estaciones convergen hacia un mismo patrón: **más días y noches cálidas y menos días fríos**, en línea con tendencias globales y regionales asociadas al calentamiento antropogénico (IPCC, 2021).

3.2 Tendencias de precipitación y eventos extremos de lluvia

El comportamiento pluviométrico de la Región Metropolitana de Guatemala muestra coherencia con la alta variabilidad interanual típica de Mesoamérica, fuertemente modulada por fenómenos oceánico–atmosféricos como ENSO y la variabilidad del Atlántico Tropical Norte. En general, el total anual de precipitación no presenta una tendencia sólida al alza o a la baja durante 1970–2024 en la mayoría de las estaciones, pero sí se observan cambios claros en **cómo** se distribuye la lluvia: mayor concentración en eventos extremos, intensificación de máximos diarios/multidarios y mayor aporte relativo de eventos del percentil 95 (R95pTOT). Estos cambios pueden modificar la estructura interna de la temporada lluviosa, aun sin alterar fuertemente el total anual.

- Estación Suiza Contenta – Periodo 1970–2024

En Suiza Contenta, el total anual de precipitación **no presenta una tendencia estadísticamente significativa**, lo cual es consistente con su localización en un entorno orográfico que puede favorecer lluvias intensas de origen convectivo–montañoso. **R95pTOT** muestra un aumento leve pero no significativo, indicando una **mayor frecuencia de eventos intensos en años recientes**. Los índices de máximos de precipitación (RX1day y RX5day) no presentan tendencia definida.

La falta de significancia estadística puede deberse a la predominancia de procesos orográficos que generan eventos intensos incluso en ausencia de cambios de fondo, lo cual amplifica la variabilidad natural del registro. Esto implica que la zona ha experimentado eventos extremos recurrentes históricamente, y los cambios recientes permanecen dentro del rango de variabilidad climática natural.

- Estación San Pedro Ayampuc (1290 m) – Periodo 1970–2024

San Pedro Ayampuc presenta una mayor variabilidad interanual, con años que oscilan entre ~800 mm (años secos) y más de 1500 mm (años húmedos). Las tendencias lineales de **PRCPTOT**, **RX1day** y **RX5day** no fueron significativas; sin embargo, persisten **años con rachas prolongadas de días húmedos ($CWD \geq 7$)** y **eventos multidiarios >200 mm**, especialmente bajo condiciones La Niña.

Aunque no se detecta una tendencia estadísticamente robusta, sin embargo, se observa un **ligero incremento en la frecuencia de meses con acumulados extremos**, lo que sugiere que aun sin cambios sostenidos en el total anual, algunos episodios están volviéndose más intensos.

- Estación INSIVUMEH (núcleo urbano, 1500 m) – Periodo 1970–2024

En la estación urbana central, el total anual muestra un **incremento de +4.5 mm/año**, aunque la variabilidad interanual sigue siendo dominante. Los indicadores de lluvia extrema exhiben señales más claras: la fracción de lluvia aportada por eventos muy intensos (**R95pTOT**) muestra una tendencia positiva significativa ($p < 0.01$), aumentando en **+2.8 puntos porcentuales por década**. Igualmente, los eventos extremadamente húmedos (**R99pTOT**) incrementan su contribución. Los máximos anuales en 1 día (**RX1day**) y en 5 días (**RX5day**) también presentan aumentos significativos (+0.43 y +0.87 mm/año, respectivamente).

En décadas previas, el máximo diario anual rondaba 60–80 mm; en años recientes supera los 100 mm.

Se observa una tendencia ascendente en **R95pTOT** ($p < 0.01$), lo que sugiere una mayor concentración de la precipitación anual en eventos intensos, aun sin un incremento sostenido del total anual.

Esto indica una **intensificación de los eventos concentrados**, característica típica de regiones urbanas donde la convección térmica, la falta de cobertura vegetal y el efecto de isla de calor pueden favorecer tormentas más intensas en periodos cortos.

- Serie de 100 años – INSIVUMEH (1926–2024)

La serie histórica de precipitación total anual (PRCPTOT) de la estación INSIVUMEH muestra una marcada **variabilidad interanual y multidecadal**, sin mostrar una tendencia de cambio definida. Sin embargo, la **media móvil de 10 años** revela **oscilaciones persistentes de humedad y sequía** que reflejan la influencia de forzantes climáticos de gran escala. Entre las décadas de 1930 y 1950 se observa un periodo predominantemente húmedo, seguido de una fase seca prolongada hacia las décadas de 1970–1990. Posteriormente, entre 2000 y 2020 se registra un repunte en la precipitación total, antes de un nuevo descenso en los últimos años.

(Figura 3)

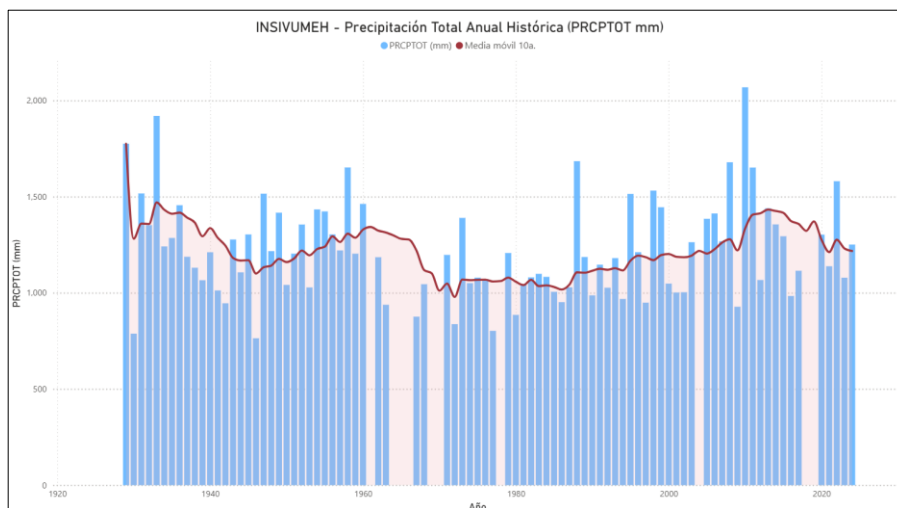


Figura 3. Precipitación total anual (barras azules) y media móvil de 10 años (línea roja) en la estación INSIVUMEH, 1926–2024.

Estas oscilaciones son coherentes con los patrones conocidos de **variabilidad climática natural en Mesoamérica**, modulados principalmente por la **Oscilación del Sur (ENSO)** y la **variabilidad del Atlántico Norte tropical (ATN/AMO)**. Fases cálidas de ENSO (El Niño) suelen coincidir con déficits de precipitación anual en el altiplano central, mientras que fases frías (La Niña) favorecen acumulados superiores al promedio, en concordancia con estudios regionales (Magaña et al., 2003; Giannini et al., 2001; Wang & Enfield, 2001).

Este comportamiento multidecadal indica que los cambios en la intensidad de la lluvia observados recientemente **no corresponden a una mayor lluvia total**, sino a una reorganización interna hacia eventos más intensos y concentrados, consistente con la física del calentamiento global y la mayor capacidad de la atmósfera para retener humedad.

*Aunque los totales anuales se mantienen relativamente estables (Figura 4), se identifican cambios profundos en la **distribución y concentración de la precipitación**.*

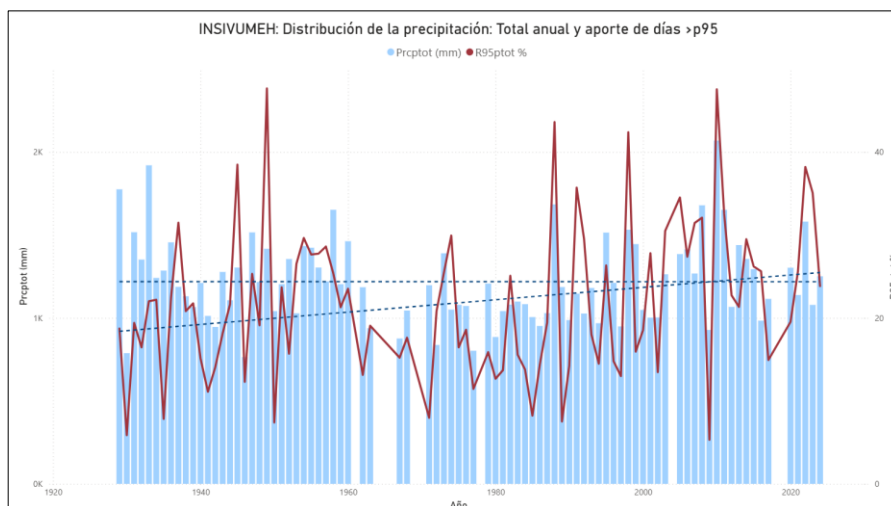


Figura 4. Distribución anual de la precipitación total (*PRCPTOT*) y fracción anual aportada por días muy lluviosos (*R95pTOT*) en la estación INSIVUMEH (1926–2024). Las barras azules representan el total anual acumulado de precipitación (mm), mientras que la línea roja indica el porcentaje del total anual correspondiente a eventos por encima del percentil 95 de lluvia diaria.

Fuente: elaboración propia con base en registros históricos de INSIVUMEH.

Por otro lado, se analizó la **estacionalidad** de la lluvia. Los datos confirman el régimen bimodal típico: temporada lluviosa de mayo a octubre, interrumpida por la *canícula* en julio-agosto (reducción temporaria de lluvia a mitad de la estación lluviosa). No se detecta un cambio estadístico significativo en el inicio o fin de la estación lluviosa, ni en la duración de la canícula, dentro del periodo analizado. Aún así, se notó que en años más recientes la recuperación de lluvias post-canícula (septiembre) tiende a ser muy abrupta, con algunos septiembres excediendo récords de precipitación. Esto realza la importancia de aprovechar la ventana relativamente seca de la canícula para **planificar obras de mitigación e infraestructura** antes del pico de lluvias de fin de temporada.

3.3 Mapas de interpolaciones IDW

- **Periodo 1970–2024**

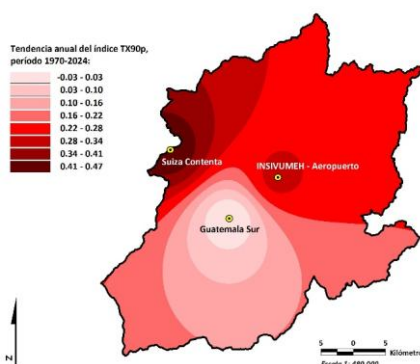
Para caracterizar los cambios espaciales en la precipitación y en los índices de extremos climáticos en la Región Metropolitana de Guatemala, se generó un conjunto de mapas de tendencia basados en series históricas de estaciones meteorológicas con registros suficientemente largos y consistentes. Se utilizaron los datos diarios de las estaciones **INSIVUMEH** y **Suiza Contenta** para el periodo **1970–2024**, complementados con la estación **Guatemala Sur**, cuyo registro abarca **1991–2024**. Esta combinación permitió integrar tanto el gradiente urbano–periférico como la variabilidad altitudinal característica del área metropolitana, habilitando

una representación espacial más robusta de los cambios en lluvia y temperatura a lo largo de las últimas cinco décadas.

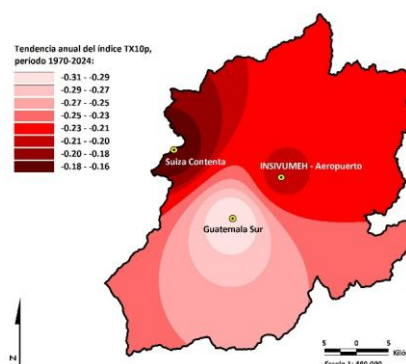
Los mapas fueron elaborados mediante interpolación espacial (IDW), lo que permitió trasladar las tendencias puntuales de cada índice hacia una superficie continua que refleja patrones geográficos de cambio. Este análisis abarca indicadores clave de precipitación (PRCPTOT, R95pTOT, R99pTOT, RX1day, RX5day, SDII) y temperatura (TX90p, TX10p, TN90p, DTR), los cuales permiten identificar zonas con intensificación de extremos, cambios en la distribución intraanual y señales diferenciadas entre sectores urbanos densos y áreas de montaña. En conjunto, los resultados ofrecen una visión espacial integrada de cómo el clima regional está cambiando y dónde estos cambios son más pronunciados.

Tendencias de temperatura

TENDENCIA ANUAL DEL ÍNDICE TX90p, PERIODO 1970-2024
Porcentaje de días cálidos / Región Metropolitana de Guatemala

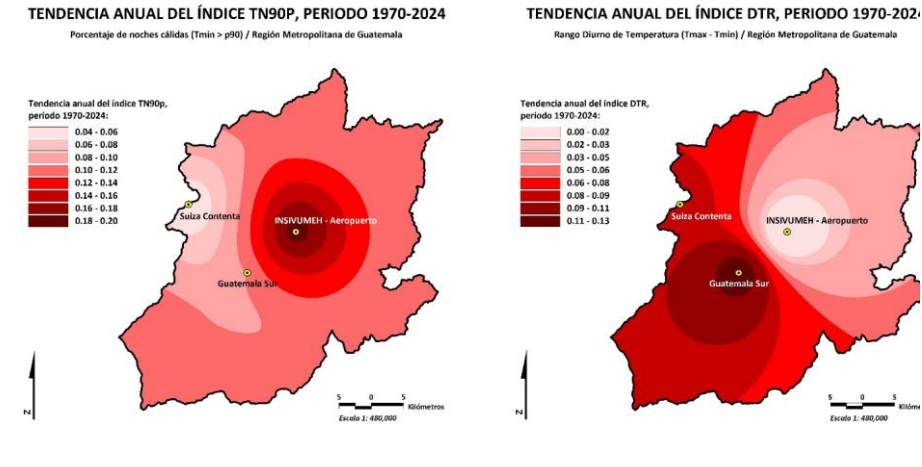


TENDENCIA ANUAL DEL ÍNDICE TX10p, PERIODO 1970-2024
Porcentaje de días fríos / Región Metropolitana de Guatemala



Aumento generalizado de días extremadamente cálidos en toda la región, con el mayor incremento en la periferia occidental (zona Suiza Contenta), donde el calentamiento diurno es más acelerado. En el núcleo urbano (INSIVUMEH–Aeropuerto) también se observa una tendencia positiva importante, coherente con el efecto de isla de calor.

Disminución sostenida de los días fríos en toda la región, con la reducción más pronunciada en la **periferia occidental** (Suiza Contenta), donde las tasas alcanzan valores cercanos a -0.30% /año. En el área urbana central (INSIVUMEH) la caída también es marcada, reflejando el impacto del **efecto de isla de calor**, que limita el enfriamiento diurno. En conjunto, el territorio experimenta una **pérdida generalizada de días fríos**, señal clara del avance del calentamiento diurno regional.

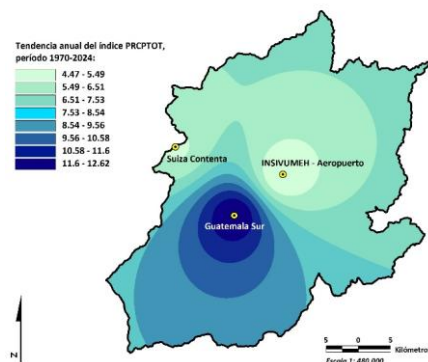


Aumento consistente de noches cálidas, con el núcleo urbano (INSIVUMEH–Aeropuerto) registrando las tendencias más altas, cercanas a 0.18–0.20 %/año. Esto evidencia un calentamiento nocturno significativo, asociado al efecto de isla de calor urbano y a la mayor retención de calor en superficies impermeables. Las zonas perimontanas, como Suiza Contenta, presentan incrementos más moderados, mientras que el sector sur muestra la señal más débil. **En conjunto, el patrón indica que las noches extremadamente cálidas son cada vez más frecuentes, reduciendo el enfriamiento nocturno.**

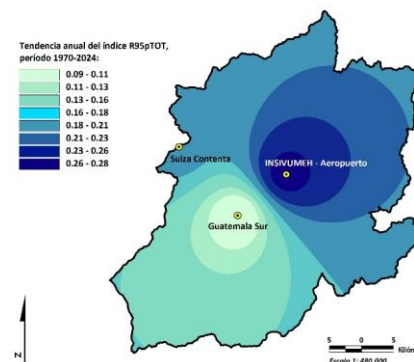
Aumento generalizado del rango diurno de temperatura. Las mayores tendencias positivas se observan en el sector suroccidental y en el entorno de Guatemala Sur, donde el DTR aumenta entre 0.9 y 1.3 °C/década, evidenciando un **calentamiento diurno más marcado** y enfriamiento nocturno relativamente menor. En Suiza Contenta las tendencias también son altas, mientras que el núcleo urbano (INSIVUMEH–Aeropuerto) presenta incrementos más moderados por la influencia del calor nocturno urbano. En conjunto, el patrón sugiere que el **calentamiento se expresa principalmente durante el día**, reforzando la intensidad de la radiación y modificando el equilibrio térmico regional.

Tendencias de precipitación

TENDENCIA ANUAL DEL ÍNDICE PRCPTOT, PERIODO 1970-2024
Total de precipitación anual en días "húmedos" (RH ≥ 1 mm) / Región Metropolitana de Guatemala



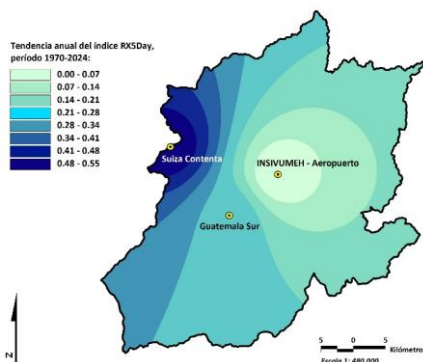
TENDENCIA ANUAL DEL ÍNDICE R95PTOT, PERIODO 1970-2024
Total anual de precipitación en días "muy húmedos" / Región Metropolitana de Guatemala



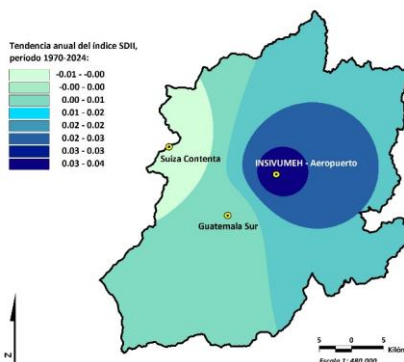
Incremento moderado pero consistente del total de precipitación anual. Las mayores tendencias positivas se concentran especialmente alrededor de Guatemala Sur, donde los aumentos superan los 100–120 mm/década. En cambio, el núcleo urbano (INSIVUMEH–Aeropuerto) y la periferia occidental (Suiza Contenta) presentan incrementos más suaves, reflejando una señal menos marcada. En conjunto, el patrón indica que, **aunque la lluvia total no muestra incrementos abruptos, sí existe una tendencia creciente en ciertos sectores del valle.**

Aumento significativo en la cantidad de lluvia proveniente de eventos muy húmedos (percentil 95). El núcleo urbano — particularmente el entorno de la estación INSIVUMEH–Aeropuerto— presenta las tendencias más altas (2.3–2.8%/década), evidenciando una intensificación de las lluvias extremas de corta duración. La periferia occidental (Suiza Contenta) muestra incrementos moderados, mientras que el sector sur registra la señal más débil. En conjunto, el patrón indica que los **eventos de lluvia muy intensa están aumentando en frecuencia y aporte hídrico.**

TENDENCIA ANUAL DEL ÍNDICE RX5DAY, PERIODO 1970-2024
Máximo en 5 días consecutivos (mm) / Región Metropolitana de Guatemala



TENDENCIA ANUAL DEL ÍNDICE SDII, PERIODO 1970-2024
Índice simple de intensidad – PRCPTOT / No. de días húmedos (mm/día) / Región Metropolitana de Guatemala



Aumento significativo en el máximo de precipitación acumulada en 5 días consecutivos en la Región Metropolitana de Guatemala. La señal más intensa se observa en la periferia occidental, especialmente en el entorno de Suiza Contenta, donde las tendencias superan los 0.48–0.55 mm/año, indicando una creciente propensión a eventos multidiarios intensos. El núcleo urbano (INSIVUMEH–Aeropuerto) presenta incrementos moderados, mientras que el sector sur muestra la señal más suave. En conjunto, **el patrón evidencia que los episodios prolongados de lluvia fuerte son cada vez más recurrentes.**

Incremento moderado en la intensidad promedio de la lluvia en días húmedos. El núcleo urbano (INSIVUMEH–Aeropuerto) muestra las tendencias más altas (0.03–0.04 mm/día por año), lo que indica que, aunque llueva un número similar de días, **cada evento tiende a ser ligeramente más intenso.** La periferia occidental (Suiza Contenta) presenta incrementos débiles o cercanos a cero, mientras que el sector sur muestra un aumento intermedio. En conjunto, el patrón sugiere que la región está experimentando **eventos de lluvia más concentrados.**

- **Periodo 1990–2024**

El análisis espacial mediante interpolación **IDW** para el periodo 1990–2024 confirma patrones consistentes entre estaciones:

- Máximos de precipitación hacia el sur de la cuenca (zona de influencia del lago de Amatitlán).
- Valores intermedios en el centro metropolitano.
- Valores menores hacia el noreste (zonas más áridas por sombra orográfica).

La comparación con los periodos anteriores muestra que **no se identifica un desplazamiento espacial significativo en los centros pluviométricos**, pero sí un incremento en la dispersión de isoyetas intensas, lo cual respalda el hallazgo de que la precipitación extrema se está concentrando más, aunque el total anual no cambie de manera marcada. Esto coincide con la intensificación de eventos R95p y RX1day/RX5day observada en las estaciones urbanas (**Figura 5**).

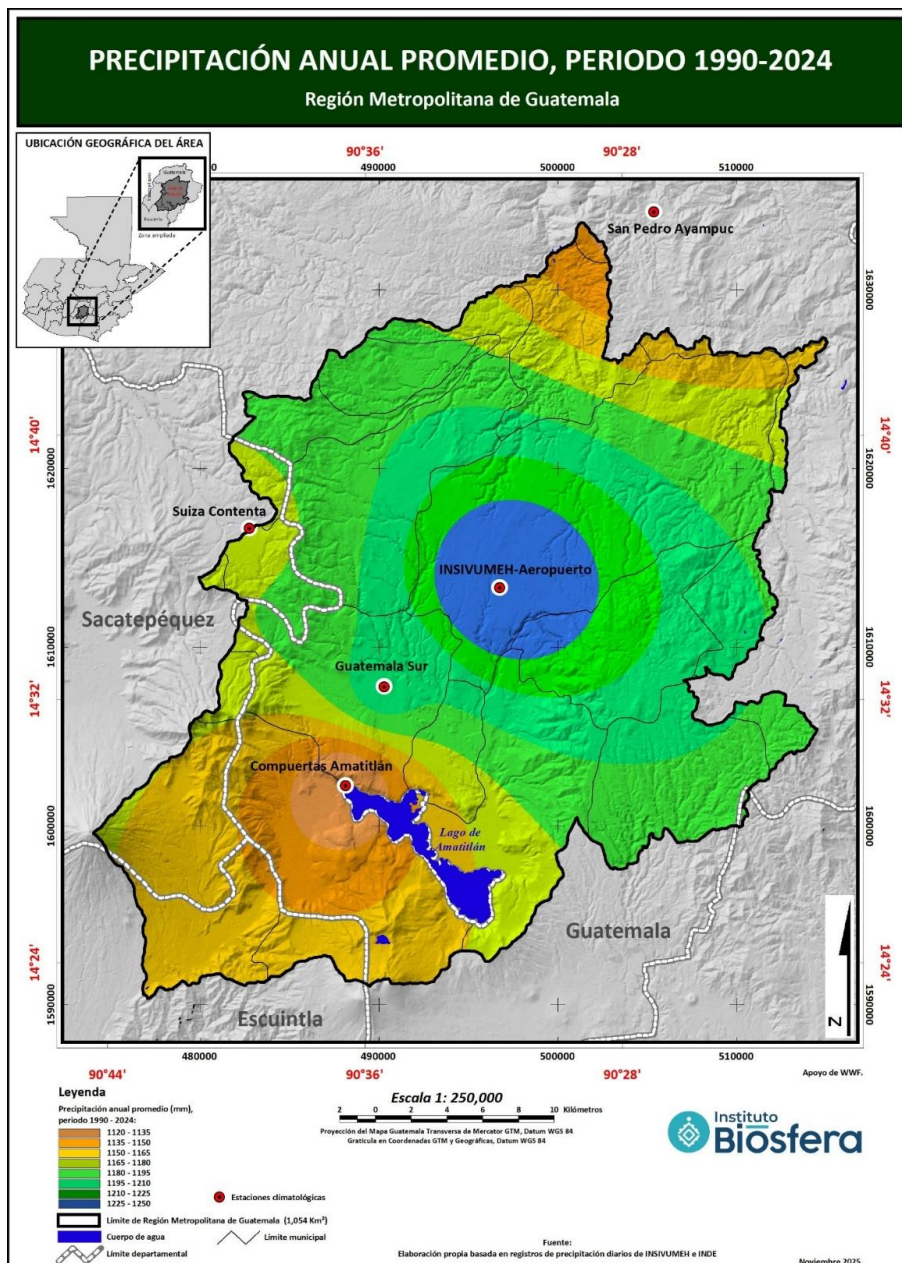


Figura 5. Precipitación anual promedio, periodo 1990-2024.

Fuente: Elaboración propia con datos de INDE e INSIVUMEH.

3.4. Integración de resultados: convergencias y diferencias urbanas–periurbanas

Los resultados muestran que el **calentamiento** es más homogéneo en la ciudad (afectando día y noche), mientras que en zonas de montaña es predominantemente diurno. En precipitación, el **total anual se mantiene estable**, pero la lluvia extrema **aumenta**, especialmente en el centro urbano donde la impermeabilización puede amplificar los riesgos de inundación. Estaciones como San Pedro Ayampuc funcionan como “sentinelas” para identificar umbrales de saturación asociados a

deslizamientos. Suiza Contenta, por su altitud, revela cambios térmicos relevantes para salud y agricultura periurbana.

Este conjunto de señales representa un cambio climático localmente detectable, alineado con los hallazgos globales del IPCC sobre intensificación de extremos térmicos y pluviométricos, aun en regiones donde los totales de lluvia no aumentan (IPCC, 2021).

4. Análisis e Implicaciones para la Gestión Territorial

La combinación de **calentamiento sostenido**, mayor frecuencia de **noches cálidas**, y creciente **concentración de la lluvia en eventos extremos** tiene implicaciones directas para la gestión urbana, la infraestructura y la seguridad hídrica. El aumento en RX1day/RX5day incrementa el riesgo de inundaciones rápidas en áreas urbanas impermeabilizadas, mientras que en laderas incrementa la probabilidad de deslizamientos. La mayor irregularidad en la precipitación —lluvias intensas cortas intercaladas con periodos secos— reduce la eficiencia de infiltración hacia los acuíferos, agravando el déficit estructural documentado para el acuífero metropolitano (EMPAGUA, 2024; Samayoa, 2013).

El aumento en temperaturas extremas incide en la demanda energética, la salud pública (riesgo de estrés térmico, especialmente nocturno), y la habitabilidad urbana. La presencia emergente de noches tropicales en la estación INSIVUMEH es un indicador crítico de la evolución del microclima urbano, con efectos potenciales sobre morbilidad y confort térmico.

Desde la perspectiva de gestión del riesgo, la mayor concentración de lluvias en septiembre–octubre exige actualizar protocolos de respuesta, dimensionamiento de drenajes y estrategias de limpieza preventiva. Los resultados refuerzan la necesidad de **soluciones basadas en naturaleza**, conservación de zonas de recarga y fortalecimiento de sistemas de alerta temprana basados en índices climáticos extremos.

Finalmente, se elaboró un cuadro de implicaciones prácticas de algunos índices clave por estación (Tabla x), útil para los tomadores de decisión en la planificación metropolitana:

Tabla 2. Índices climáticos destacados y sus implicaciones operativas en la gestión metropolitana.

Estación (entorno)	Índice (variable)	Interpretación/Usos prácticos en gestión local
INSIVUMEH (Urbano centro)	PRCPTOT (lluvia total anual/mensual)	Magnitud de lluvia acumulada. Años o meses muy lluviosos indican necesidad de reforzar limpieza de drenajes y manejo de escorrentías. Sirve de base para dimensionar obras pluviales.

	R95pTOT / R99pTOT (% lluvia extrema anual)	Porcentaje del total anual caído en eventos muy lluviosos. Un aumento implica mayor riesgo de inundaciones por eventos concentrados; orienta la activación de planes de emergencia en temporada de huracanes.
	RX5day (mm en 5 días, anual/mensual)	Picos de lluvia en periodos multidiarios. Umbrales altos (ej. >P90 histórico) advierten sobre posibles deslaves y colapso temporal de drenajes. Útil para alertas operativas en meses críticos (sep–oct).
	R20mm / R30mm (días $\geq 20/\geq 30$ mm por mes)	Frecuencia de eventos fuertes por mes. Meses con muchos días ≥ 20 mm requieren intensificar mantenimiento preventivo (desobstrucción de alcantarillas, etc.).
	SDII (intensidad media de lluvia)	Lluvias más intensas (SDII alta) sugieren que aunque no aumente el total anual, la lluvia cae en menos tiempo, lo que indica posible sobrecarga de alcantarillado. Señala necesidad de mejorar capacidad de captación o ampliar alcantarillas.
	TR20 (noches tropicales)	Aunque el valor de este índice es 0 en la mayoría de décadas (ninguna noche $>20^\circ\text{C}$), su aparición en la actualidad puede ser indicador de fuerte efecto de calor nocturno de la ciudad.
San Pedro Ayampuc (Laderas del norte)	RX5day (mm en 5 días, anual/mensual)	Acumulados altos en pocos días saturan suelos en laderas. Si un mes excede cierto umbral (ej. >150 mm en 5 días), activar vigilancia de taludes y protocolos de evacuación preventiva en comunidades en pendiente.
	CWD (racha húmeda, días)	Duración de periodos lluviosos continuos. Rachas $\geq 5-7$ días de lluvia continua predisponen a derrumbes y deslaves. Al superarse estos umbrales se recomienda restricción preventiva en rutas vulnerables y monitoreo geotécnico.
Suiza Contenta (Periurbano de montaña occidental)	TX90p / TX10p (% días cálidos/fríos)	Indican el nivel de calor diurno anómalo. Aumento de TX90p sugiere posibles afectaciones a salud (golpes de calor) y agricultura local. Planificar campañas de arborización para proveer sombra y enfriamiento.

	DTR (rango diurno de temp.)	Un DTR en aumento significa días más calientes sin equivalente aumento nocturno. Impacta ecosistemas (estrés hídrico diurno en plantas) y puede modificar demanda de riego. Relevante para ajustar prácticas agrícolas locales.
--	------------------------------------	---

Entre las **limitaciones del estudio**, cabe mencionar que algunas series de datos contienen brechas (especialmente en los años 1970s de ciertas estaciones) que debieron ser interpoladas o dejadas fuera de cálculos de tendencia, lo que introduce incertidumbre.

No obstante, las tendencias principales señaladas (ej. TX90p en alza, TX10p a la baja, R95p al alza) son tan fuertes que se mantuvieron significativas pese a incertidumbres en datos faltantes.

Otra limitación es la representatividad espacial: las estaciones puntuales pueden no captar microclimas de áreas específicas (ej. zonas industriales más cálidas, áreas boscosas más frescas). Idealmente se complementaría con datos satelitales o modelos de alta resolución para mapear variaciones intra-urbanas.

Tampoco se abordó en profundidad la influencia de cambios en uso del suelo fuera de la estación (por ejemplo, la estación INSIVUMEH ha visto crecer la mancha urbana a su alrededor, lo cual en sí altera su registro). Pese a ello, la consistencia de los resultados con la física esperada y con estudios independientes da confianza en las conclusiones generales.

5. Conclusiones

- **Temperatura (área urbana vs periurbana)**

El análisis térmico muestra diferencias claras entre el núcleo urbano y las zonas periurbanas de montaña. En la estación urbana INSIVUMEH (~1500 m), el calentamiento es más intenso y abarca tanto el día como la noche: la temperatura media del aire aumenta aproximadamente +0.025 °C/año y los índices de extremos térmicos indican un incremento sostenido de días y noches cálidas (TX90p +0.306 %/año; TN90p +0.385 %/año) y una disminución de días y noches frías (TX10p -0.200 %/año; TN10p -0.244 %/año; $p < 0.001$).

En contraste, en la estación periurbana de montaña Suiza Contenta (~2100 m) el calentamiento se manifiesta principalmente en las temperaturas máximas diurnas (TX90p en aumento, TX10p en descenso, DTR al alza), mientras que los extremos nocturnos no muestran cambios estadísticamente significativos. San Pedro Ayampuc presenta una señal intermedia, con indicios de calentamiento pero con mayor ruido por brechas de datos.

En conjunto, la temperatura media regional aumenta alrededor de +0.022 °C/año ($\approx +1.1$ °C en cinco décadas), con un calentamiento más completo (día-noche) en el centro urbano y más diurno en la periferia alta. Esto es coherente con la

combinación de cambio climático global y efectos locales de urbanización e isla de calor.

- **Precipitación (cantidad total vs eventos extremos)**

En el componente pluviométrico, las diferencias entre área urbana y periurbana no se expresan tanto en la cantidad total anual como en la forma en que se concentra la lluvia. En las tres estaciones analizadas (INSIVUMEH, Suiza Contenta y San Pedro Ayampuc), el total anual de precipitación (PRCPTOT) no presenta una tendencia robusta, manteniéndose dentro de un rango medio de ~1250–1450 mm/año, con fuerte variabilidad interanual modulada por ENSO y otros forzantes de gran escala.

En INSIVUMEH se detecta un incremento estadísticamente significativo de alrededor de +4.5 mm/año, mientras que en Suiza Contenta y San Pedro Ayampuc las tendencias lineales de PRCPTOT no son significativas. Sin embargo, en el entorno urbano central se observa una intensificación clara de los eventos extremos: la fracción de lluvia anual aportada por días muy húmedos (R95pTOT) aumenta de ~24–26 % en los años setenta a ~35–40 % en la actualidad, con una pendiente de +0.28 puntos (2.8 por década) ($p < 0.01$), y los máximos anuales RX1day y RX5day muestran incrementos de +0.43 y +0.87 mm/año, respectivamente ($p < 0.05$). En Suiza Contenta y San Pedro Ayampuc, los índices de eventos intensos permanecen dentro de la variabilidad natural, con señales de aumento más débiles o no significativas, aunque en años específicos se registran rachas húmedas prolongadas (CWD) relevantes para deslizamientos.

En síntesis, el régimen de lluvia total no cambia de forma drástica, pero en el área urbana se concentra cada vez más en pocos eventos muy intensos, mientras que las zonas periurbanas mantienen un régimen extremo asociado sobre todo a la orografía y a la variabilidad climática natural.

- **Implicaciones en el contexto de cambio climático**

La combinación de aumento sostenido de las temperaturas y mayor concentración de la precipitación en eventos intensos constituye una señal coherente de cambio climático localmente detectable, más marcada en el núcleo urbano que en las periferias de montaña. En el área urbana, el calentamiento día-noche, la aparición reciente de noches tropicales ($TR20 > 0$ a partir de 2010) y el incremento de R95pTOT, RX1day y RX5day son consistentes con los patrones descritos por el IPCC para ciudades de clima tropical y subtropical, donde la influencia antropogénica intensifica extremos térmicos y pluviométricos.

De manera complementaria, la Tercera Comunicación Nacional sobre Cambio Climático en Guatemala identifica al Área Metropolitana como un territorio altamente expuesto a olas de calor, lluvias extremas e inundaciones repentinas, reforzando que estos cambios observados a nivel local forman parte de una tendencia de riesgo climático ya reconocida a escala nacional (MARN et al., 2021, Cap. 4).

En las zonas periurbanas de mayor altitud, el calentamiento diurno y la persistencia de eventos lluviosos intensos sugieren un acoplamiento entre el cambio climático de gran escala y las particularidades topográficas de la región. De forma general, el Área Metropolitana de Guatemala transita hacia un clima más cálido y con episodios de lluvia más extremos, sin un aumento compensatorio del volumen anual de precipitación, lo que agrava la presión sobre el acuífero, la infraestructura urbana y la gestión del riesgo de desastres.

6. Lineamientos Estratégicos para la Gestión Climática y la Seguridad Hídrica Metropolitana

- **Fortalecimiento del monitoreo climático urbano y periurbano**

Es prioritario consolidar y ampliar la red de estaciones meteorológicas en el área metropolitana, incorporando más puntos de medición en barrios urbanos densos y en zonas periurbanas críticas (laderas inestables, áreas de recarga hídrica). Se recomienda mantener series continuas de temperatura y precipitación, integrar índices de extremos (TX90p, TN90p, R95pTOT, RX5day, CWD, TR20) en un sistema de vigilancia climática y vincularlos a umbrales operativos para salud, drenaje y protección civil.

- **Planificación urbana adaptativa y mitigación del calor**

Dado el calentamiento más intenso en el núcleo urbano, se sugiere incorporar explícitamente los hallazgos térmicos en el ordenamiento territorial y la normativa de construcción: incremento de áreas verdes y corredores bioclimáticos que atenúen la isla de calor, protección de parques como “islas frescas” y uso de materiales y diseños urbanos que reduzcan la acumulación de calor. Estas medidas deben priorizarse en sectores de alta densidad poblacional y vulnerabilidad socioeconómica, donde el estrés térmico y la demanda energética serán mayores.

- **Gestión integral de la precipitación extrema y drenaje pluvial**

El aumento de la intensidad de los eventos de lluvia, especialmente en septiembre–octubre, exige revisar el diseño de la infraestructura de drenaje pluvial y de control de escorrentías. Se recomienda dimensionar alcantarillas, colectores y estructuras de retención considerando los nuevos niveles de RX1day y RX5day, así como promover soluciones basadas en la naturaleza (humedales urbanos, zanjas de infiltración, pavimentos permeables) que favorezcan la infiltración y reduzcan picos de caudal. En laderas periurbanas, los índices CWD y RX5day deben utilizarse como referencia para establecer umbrales de alerta por deslizamientos y para orientar el manejo de taludes y obras de contención.

- **Gestión hídrica y protección del acuífero metropolitano**

La ausencia de aumentos significativos en el volumen anual de lluvia, junto con su concentración en pocos eventos intensos, refuerza la necesidad de una gestión hídrica más estratégica. Es indispensable proteger las zonas de recarga en la periferia montañosa, frenar la urbanización sobre suelos de alta infiltración y

promover la recarga inducida en época lluviosa. La captación de agua de lluvia a escala de edificio y barrio, combinada con un control más estricto de la extracción de aguas subterráneas, puede contribuir a disminuir el déficit anual del acuífero y a mejorar la resiliencia hídrica metropolitana.

- **Ordenamiento territorial y gestión del riesgo de desastres**

Los cambios observados justifican la actualización de instrumentos de planificación territorial y de gestión del riesgo. Se recomienda incorporar mapas de amenaza basados en índices extremos de lluvia y temperatura, ajustar códigos y normas para infraestructuras críticas (drenajes, puentes, taludes, redes viales) a escenarios con eventos más intensos, e integrar estos criterios en planes municipales y metropolitanos. San Pedro Ayampuc y otras zonas de ladera deben ser consideradas “estaciones centinela” para la activación temprana de protocolos ante rachas húmedas prolongadas y acumulados extremos de lluvia.

- **Educación, comunicación y participación comunitaria**

Finalmente, es fundamental traducir estos resultados técnicos en mensajes claros para la población, instituciones y sectores productivos. Programas de educación climática pueden fortalecer la percepción del riesgo asociado a olas de calor, inundaciones súbitas y deslizamientos, promoviendo acciones como el mantenimiento comunitario de drenajes, la protección de áreas verdes y la preparación de planes familiares de emergencia. La participación social informada facilitará la implementación de medidas de adaptación y reducción del riesgo alineadas con la evidencia climática generada por este estudio.

En síntesis, el clima metropolitano de Guatemala muestra un proceso de intensificación térmica e hidrológica, con consecuencias directas para la seguridad hídrica, la salud pública, la infraestructura urbana y la gestión del riesgo. La mayor frecuencia de temperaturas elevadas y la creciente concentración de la precipitación en eventos extremos incrementan la exposición de la población a olas de calor nocturnas, inundaciones locales, desbordamientos y deslizamientos en un territorio altamente urbanizado. En este contexto, la consolidación de una red de observación continua, el fortalecimiento de los sistemas de alerta temprana y el uso sistemático de índices climáticos se vuelven esenciales para orientar políticas de ordenamiento territorial, adaptación y reducción del riesgo de desastres basadas en evidencia científica.

7. Referencias

Aguilar, E., Peterson, T. C., Obando, P. R., et al. (2005). *Changes in precipitation and temperature extremes in Central America and northern South America, 1961–2003. Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 110(D23). <https://doi.org/10.1029/2005JD006119>

- Allan, R. P., & Soden, B. J. (2008). *Atmospheric warming and the amplification of precipitation extremes*. *Science*, 321(5895), 1481–1484. <https://doi.org/10.1126/science.1160787>
- Batz Cotill, J. E. (2023). *Influencia de la orografía del territorio guatemalteco en la canícula* [Tesis de licenciatura, Universidad de San Carlos de Guatemala].
- Burrough, P. A., & McDonnell, R. A. (1998). *Principles of geographical information systems*. Oxford University Press.
- Celada, C., Reyes, L., & Santos, M. (2020). *Diagnóstico hidrogeológico de la región metropolitana de Guatemala*. Instituto Privado de Investigación sobre Cambio Climático (ICC).
- Donat, M. G., Lowry, A. L., Alexander, L. V., O’Gorman, P. A., & Maher, N. (2016). *More extreme precipitation in the world’s dry and wet regions*. *Nature Climate Change*, 6, 508–513. <https://doi.org/10.1038/nclimate2941>
- Durán-Quesada, A. M., Gimeno, L., Amador, J. A., & Nieto, R. (2017). *Moisture sources for Central America: Variability and links to precipitation patterns*. *Climate Dynamics*, 48, 905–924. <https://doi.org/10.1007/s00382-016-3123-6>
- EMPAGUA. (2024). *Informe técnico de disponibilidad y extracción de aguas subterráneas en el área metropolitana de Guatemala*. Empresa Municipal de Agua de Ciudad de Guatemala.
- ETCCDI (Expert Team on Climate Change Detection and Indices). (2009). *Definitions of the 27 core indices*. Pacific Climate Impacts Consortium. https://etccdi.pacificclimate.org/list_27_indices.shtml
- IARNA-URL & The Nature Conservancy. (2012). *Estudio de la huella hídrica de la región metropolitana de Guatemala*. Universidad Rafael Landívar.
- IPCC. (2021). Annex VII: Glossary. En *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. Cambridge University Press (Informe del Grupo de Trabajo I del IPCC AR6).
- LS3-USAC. (2013). *Efecto de isla de calor urbano en parques de la Ciudad de Guatemala*. Laboratorio de Suelos y Sistemas Sostenibles, Facultad de Agronomía, Universidad de San Carlos de Guatemala.
- MAGA (Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación de Guatemala). (2001). *Fisiografía de la República de Guatemala*. Sección Altiplano Central (valles graben y materiales volcánicos).

Magaña, V., Amador, J. A., & Medina, S. (1999). *The Midsummer Drought over Mexico and Central America*. *Journal of Climate*, 12(6), 1577–1588. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1999\)012<1577:TMDOMA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1999)012<1577:TMDOMA>2.0.CO;2)

Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales [MARN], Sistema Guatemalteco de Ciencias del Cambio Climático [SGCCC], & Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo [PNUD]. (2021). *Tercera comunicación nacional sobre cambio climático de Guatemala*. Editorial Universitaria UVG. https://www.marn.gob.gt/wpfd_file/tercera-comunicacion-nacional-sobre-cambio-climatico-2/

NOAA/NCEI. (2021). Understanding Climate Normals. National Oceanic and Atmospheric Administration. <https://www.ncei.noaa.gov/news/noaa-delivers-new-us-climate-normals>

Oke, T. R. (1987). *Boundary Layer Climates* (2nd ed.). Methuen.

OMM (Organización Meteorológica Mundial). (2017). *WMO Guidelines on the Calculation of Climate Normals (WMO-No. 1203)*. Ginebra: OMM.

OMM. (2021). Updated 30-year reference period reflects changing climate. Nota de prensa, World Meteorological Organization.

Pérez, C., Amador, J. A., & Rivera, E. (2014). *Tendencias en la precipitación extrema en Centroamérica y su relación con ENSO*. *Revista Geográfica*, 155, 25–48.

Ribes, A., et al. (2024). Central American climate extreme trends: A statistical analysis of ETCCDI indices. *International Journal of Climatology*. <https://rmets.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/joc.8571>

Samayoa, O. E. (2013). *Estudio hidrogeológico del acuífero metropolitano de Guatemala*. Instituto de Investigaciones Hidrológicas y Ambientales, USAC.

Stewart, I. D., & Oke, T. R. (2012). *Local climate zones for urban temperature studies*. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93(12), 1879–1900. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00019.1>

United States Environmental Protection Agency (EPA). (2025). *Mantenerse fresco: cómo pueden las comunidades reducir el efecto de isla de calor*. EPA en español (hoja informativa de mitigación urbana).

Wang, C., & Enfield, D. B. (2001). *The tropical Western Hemisphere warm pool*. *Geophysical Research Letters*, 28(8), 1635–1638. <https://doi.org/10.1029/2000GL011763>

