

Cálculo de indicadores (evidencias) de cambio climático para Colombia 1981-2020 con el uso de inqc, climatol y climact (Metodología actualizada de RClimdex)

Autores

José Franklyn Ruiz Murcia¹
Jeimmy Yanely Melo Franco¹
Sandra Milena Herrera Aponte¹
Eliana Katherine Fonseca Gutiérrez²
Araminta Vega Burgos¹

¹Grupo de modelamiento numérico de tiempo y clima

²Grupo de Gestión de Datos y Red Meteorológica



**CÁLCULO DE INDICADORES (EVIDENCIAS) DE CAMBIO CLIMÁTICO PARA COLOMBIA
1981-2020 CON EL USO DE INQC, CLIMATOL Y CLIMPACK (METODOLOGÍA ACTUALIZADA
DE RCLIMDEX)**

RESUMEN

Tal vez el único aplicativo desde 2004 para determinar evidencias de cambio climático ha sido el paquete desarrollado en R conocido como Climdex (*Rclimdex*); el cual luego de un proceso de control de calidad de los datos, estima tendencias anuales de 27 indicadores de cambio climático sin que las series de datos diarios pasaran por un proceso de homogeneización. Para 2023, la Organización Meteorológica Mundial (OMM) sugiere de algún modo no omitir este proceso intermedio con el fin de obtener una mejor estimación de las evidencias de cambio climático con base en grupos de estaciones que comparten una misma señal climática.

En correspondencia con lo anterior, en éste documento se presenta el análisis de datos diarios de precipitación y temperatura máxima y mínima sobre 228 estaciones que cubren la mayor parte del país para el período 1981-2020; a los cuales se les realizó un proceso de control de calidad (inqc), posteriormente se homogenizaron las series (climatol) aplicando el standard normal homogeneity test (SNHT), y finalmente se calcularon las tendencias anuales sobre 12 indicadores de cambio climático a partir de los 67 que ofrece este paquete de R, climpack.

Con la salvedad de que hay una variabilidad espacial en los resultados de los indicadores sobre el territorio nacional y que, los indicadores asociados con la temperatura son en su mayoría estadísticamente significativos ($p\text{-value}<0.05$) con respecto a lo que ocurre con los asociados a precipitación ($p\text{-value}>0.05$); para Colombia dicha metodología estimó que: la temperatura mínima diaria (TNm) ha aumentado a razón de $+0.207\pm0.035^{\circ}\text{C}/\text{década}$, la temperatura media del aire (TMm) en $+0.241\pm0.026^{\circ}\text{C}/\text{década}$ y la temperatura máxima diaria (TXm) en $+0.276\pm0.025^{\circ}\text{C}/\text{década}$; indicando en general que, la temperatura del aire ha estado aumentado. La ocurrencia del percentil 10 de la temperatura mínima (TN10p) ha disminuido en $-0.186\pm0.058\%/ \text{década}$; mientras que, la ocurrencia del percentil 90 (TX90p) ha aumentado a una razón de $+4.089\pm0.410\%/ \text{década}$; así mismo, el rango diario de temperatura (DTR) se ha incrementado a razón de $+0.071\pm0.040^{\circ}\text{C}/\text{década}$ y las duraciones de las olas de calor (WSDI) han aumentado a razón de $+0.220\pm0.199\text{día}/\text{década}$; todo lo anterior, señalando que tanto las noches como los días se han tornado más cálidos. Con respecto a la precipitación, ésta se ha incrementado a una tasa de $+22,8\text{mm}/\text{década}\pm18.6\text{mm}/\text{década}$, el porcentaje de ocurrencia del percentil 95 (R95p) ha aumentado a razón de $5.89\pm13.23\%/ \text{década}$; mientras que la ocurrencia del percentil 99 (R99p) en $0.06\pm0.22\%/ \text{década}$; mostrando que los eventos de precipitación “fuertes” y “muy fuertes” se han estado incrementando (mayormente en la región Andina). Finalmente, la duración máxima de los períodos secos (CDD) ha aumentado en $+0.183\pm0.82\text{días}/\text{década}$ (Mayormente en la región Caribe); mientras que, la duración máxima del período húmedo (CWD) lo ha hecho a razón de $+0.22\pm0.52\text{días}/\text{década}$.

Palabras claves: climatología, cambio climático.

ABSTRACT

Perhaps the only application since 2004 to determine evidence of climate change has been the package developed in R known as Climdex (RClimdex); which, after a data quality control process, estimates annual trends of 27 climate change indicators without the daily data series going through a homogenization process. For 2023, the World Meteorological Organization (WMO) suggests somehow not omitting this intermediate process in order to obtain a better estimate of the evidence of climate change based on groups of stations that share the same climate signal.

In correspondence with the above, daily precipitation and maximum and minimum temperature data were analyzed on 228 stations that cover most of the country for the period 1981-2020; to which a quality control process (inqc) was carried out, then the series were homogenized (climatol) by applying the standard normal homogeneity test (SNHT), and finally the annual trends were calculated on 12 climate change indicators to starting from the 67 that this R Climpack package offers.

With the exception that there is spatial variability in the results of the indicators over the national territory and that the indicators associated with temperature are mostly statistically significant ($p\text{-value} < 0.05$) with respect to what happens with those associated with precipitation. ($p\text{-value} > 0.05$); For Colombia, this methodology estimated that: the minimum daily temperature (TNm) has increased at a rate of $+0.207 \pm 0.035^\circ\text{C/decade}$, the average air temperature (TMm) at $+0.241 \pm 0.026^\circ\text{C/decade}$ and the maximum daily temperature (TXm) at $+0.276 \pm 0.025^\circ\text{C/decade}$; generally indicating that the air temperature has been increasing. The occurrence of the 10th percentile of the minimum temperature (TN10p) has decreased by $-0.186 \pm 0.058\%/decade$; while, the occurrence of the 90th percentile (TX90p) has increased at a rate of $+4.089 \pm 0.410\%/decade$; Likewise, the daily temperature range (DTR) has increased at a rate of $+0.071 \pm 0.040^\circ\text{C/decade}$ and the durations of heat waves (WSDI) have increased at a rate of $+0.220 \pm 0.199\text{day/decade}$; all of the above, pointing out that both the nights and the days have become warmer. With respect to precipitation, it has increased at a rate of $+22.8\text{mm/decade} \pm 18.6\text{mm/decade}$, the percentage of occurrence of the 95th percentile (R95p) has increased at a rate of $5.89 \pm 13.23\%/decade$; while the occurrence of the 99th percentile (R99p) at $0.06 \pm 0.22\%/decade$; showing that “strong” and “very strong” precipitation events have been increasing (mostly in the Andean region). Finally, the maximum duration of dry periods (CDD) have increased by $+0.183 \pm 0.82\text{ days/decade}$ (Mostly in the Caribbean region); while, the maximum duration of the wet period (CWD) has increased at a rate of $+0.22 \pm 0.52\text{ days/decade}$.

Keywords: climatology, climate change.

Contenido

1. INTRODUCCIÓN	5
2. DATOS Y METODOLOGÍA	10
2.1. <i>Control de calidad (INQC).....</i>	<i>12</i>
2.2. <i>Homogeneización (paquete climatol y la función homogen).....</i>	<i>13</i>
2.3. <i>Cálculo de indicadores de cambio climático (climact)</i>	<i>19</i>
3. ANÁLISIS Y RESULTADOS	24
CONCLUSIONES.....	41
AGRADECIMIENTOS	43
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	44
ANEXO 1. Indicadores de cambio climático para los trimestres DEF, MAM, JJA y SON	47
ANEXO 2. Mapa del régimen pluviométrico de Colombia	55

1. INTRODUCCIÓN

De acuerdo con el último reporte (AR6) del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC por sus siglas en inglés), las actividades humanas han causado inequívocamente el calentamiento global, principalmente a través de las emisiones de gases de efecto invernadero, y la temperatura de la superficie global ha alcanzado 1,1°C por encima del período 1850-1900 en 2011-2020. Las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero han seguido aumentando debido a desiguales derivadas del uso insostenible de la energía, el uso y el cambio de uso del suelo, los estilos de vida y los patrones de consumo y producción entre regiones, entre países y dentro de ellos; así como, entre individuos (nivel de confianza alto) (IPCC, 2023).

Adicionalmente, el reporte menciona que, la temperatura de la superficie mundial fue 1,09 [0,95 a 1,20] °C más alta en 2011-2020 que en 1850-1906, con aumentos mayores sobre la tierra (1,59 [1,34 a 1,83] °C) que sobre el océano (0,88 [0,68 a 1,01] °C). La temperatura de la superficie global en las dos primeras décadas del siglo XXI (2001-2020) fue 0,99 [0,84 a 1,10] °C más alta que la del período 1850-1900; y a su vez ha aumentado más rápidamente desde 1970 que en cualquier otro período de 50 años durante al menos los últimos 2000 años (nivel de confianza alto).

También se han producido cambios rápidos y generalizados en la atmósfera, el océano, la criósfera y la biosfera. El cambio climático causado por el hombre ya está afectando a muchos fenómenos meteorológicos y climáticos extremos en todas las regiones del mundo, lo que ha provocado impactos adversos generalizados y pérdidas y daños relacionados a la naturaleza y a las personas (nivel de confianza alto). Las comunidades vulnerables que históricamente han contribuido menos al cambio climático actual se ven afectadas de manera desproporcionada (nivel de confianza alto).

Este reporte del IPCC afirma que aproximadamente entre 3.300 y 3.600 millones de personas viven en contextos altamente vulnerables al cambio climático. La vulnerabilidad humana y la de los ecosistemas son interdependientes. Las regiones y las personas con considerables limitaciones de desarrollo son muy vulnerables a los peligros climáticos. El aumento de los fenómenos meteorológicos y climáticos extremos han expuesto a millones de personas a una inseguridad alimentaria aguda y a una reducción de la seguridad hídrica; observándose los mayores impactos adversos en muchos lugares y/o comunidades de África, Asia, Centroamérica, Suramérica, islas pequeñas y el Ártico, y a nivel mundial para los pueblos indígenas, los productores de alimentos a pequeña escala y los hogares de bajos ingresos. Entre 2010 y 2020, la mortalidad humana por inundaciones, sequías y tormentas fue 15 veces mayor en regiones altamente vulnerables en comparación con regiones con vulnerabilidad muy baja.

En todas las regiones, los aumentos de los fenómenos de calor extremo han provocado mortalidad y morbilidad humana (nivel de confianza muy alto). Han aumentado la aparición de enfermedades transmitidas por los alimentos y el agua relacionadas con el clima (confianza muy alta) y la incidencia de enfermedades transmitidas por vectores (confianza alta). En las regiones evaluadas, algunos desafíos de salud mental están asociados con el aumento de las temperaturas (nivel de confianza alto), el trauma causado por eventos extremos (nivel de confianza muy alto) y la pérdida de medios de vida y cultura (nivel de confianza alto). Los fenómenos climáticos y meteorológicos extremos están impulsando cada vez más los desplazamientos de manera desproporcionada en relación con el tamaño de la población.

En las zonas urbanas, el cambio climático observado ha causado impactos adversos en la salud humana, los medios de vida y la infraestructura. Los extremos cálidos se han intensificado en las ciudades. La infraestructura urbana, incluidos los sistemas de transporte, agua, saneamiento y energía se han vistos comprometidos por fenómenos extremos y de evolución lenta con las consiguientes pérdidas económicas, interrupciones de los servicios e impactos negativos para el bienestar; impactos que se concentran entre los residentes urbanos económica y socialmente marginados.

Para llegar a muchas de las anteriores conclusiones se han evaluado indicadores de cambio de cambio climático a través de estadísticas anuales del clima que responden a preguntas comunes tales como: ¿Qué tan caluroso fue el día más caliente del año?, ¿Qué fracción de noches de cada año estuvo por debajo del percentil 10 de temperatura mínima? o ¿Cuánta precipitación cayó durante los 5 días más lluviosos del año? Dónde adicionalmente, hay índices que pueden ser calculados para un mes determinado en un periodo determinado; cómo, por ejemplo, el día más caluroso de los eneros (<https://climact-sci.org/indices/>).

Para responder a ello, la comunidad científica internacional ha generado metodologías que ofrecen índices derivados de datos diarios de temperatura y precipitación. Estos índices son un conjunto estandarizado recomendado originalmente por el Equipo de Expertos en Índices Climáticos Sectoriales Específicos (ET-SCI) y ahora bajo la supervisión del Equipo de Expertos en Información Climática para la Toma de Decisiones. La estandarización de estos índices permite a los investigadores comparar resultados entre períodos de tiempo, regiones y conjuntos de datos de origen (<https://climact-sci.org/indices/>).

Inicialmente el software utilizado para estos propósitos fue ClimDex. De acuerdo con [Chang & Yang \(2004\)](#) el objetivo original era implementarlo en un entorno que no dependiera de un sistema operativo en particular. Fue muy natural utilizar R como plataforma, ya que R es un software gratuito pero muy robusto y potente para el análisis estadístico y gráfico. Pero, el objetivo principal de la construcción de índices de extremos climáticos es utilizarlos para estudios de detección y monitoreo del cambio climático, lo que requiere que los índices estén homogeneizados; desafortunadamente no se implementó y aún la versión actual del RClimDex solo incluye un procedimiento simple de control de calidad de datos previo al cálculo de los índices. Por ello, la metodología de construcción de los indicadores se realizaba en 3 pasos: 1) La instalación de R y la configuración del entorno del usuario, 2) Control de calidad de los datos climáticos diarios, y 3) Cálculo de los 27 índices básicos.

Esta metodología a nivel nacional fue utilizada por [Benavides, et. al \(2007\)](#), [Mayorga, et. al \(2011\)](#) y actualizada entre el Ideam y la Universidad Nacional de Colombia ([2018](#)). Expresando este último que: *"Comparativamente con lo realizado por Mayorga, et al. (2011) no hay mayores diferencias en cuanto al signo de las tendencias; sin embargo, la estimación de tendencias en el período 1980-2011 está afectada por el máximo histórico de precipitación observado en la segunda mitad del año 2010 y en el 2011 relacionado con una fase extrema de variabilidad climática interdecadal, por ello los valores de las tendencias de aumento son mayores que los establecidos previamente por Mayorga et al. (2011). En esta situación es posible concluir que efectivamente la precipitación está aumentando en la mayor parte del país, pero la magnitud de la tendencia estaría entre las dos estimaciones (la de Mayorga et al. (2011) y esta que se presenta en este informe). En cuanto a la intensidad de los eventos más extremos de lluvia diaria (tomando los eventos que sobrepasan el percentil 99) analizada para el período 1980-2011, hay una diferenciación regional (aumentos en*

algunas regiones y disminuciones en otras), sin embargo, son más los lugares en donde están haciéndose más intensos estos eventos, que en los que hay debilitamiento”.

Entre algunos otros estudios regionales se destacan los de [Ocampo & López \(2020\)](#) para el departamento de Cauca, en el cual obtuvieron que, tanto la cantidad de precipitación como la duración de los periodos húmedos han estado aumentando; resultado que tiene un nivel de confianza del 90%. Por otra parte, [Pinilla & Pinzón \(2012\)](#) realizaron un análisis para el centro del departamento de Santander, en el cual afirman que se presentan tendencias negativas de la precipitación total anual y en el número de días al año cuando la precipitación es mayor a 20 mm y 40 mm; por el contrario, se presentaron tendencias positivas para la precipitación máxima anual en un día y para la precipitación total anual mayor al percentil 99.

No obstante, para resolver el problema de la homogeneización de datos expresado anteriormente en el cálculo de indicadores de cambio climático con el uso de RClimDex, la Organización Meteorológica Mundial (OMM) a través de la segunda edición sobre CAPACITACIÓN EN SERVICIOS CLIMÁTICOS llevada a cabo en la ciudad de La Antigua (Guatemala), del 08 al 19 de mayo de 2023, recomendó a los servicios hidrometeorológicos pertenecientes a las regiones ARIII y ARIV de la OMM estandarizar una metodología de cálculo ahora en estos 3 pasos: 1) Control de calidad de datos diarios de precipitación y temperaturas (mínima y máxima), 2) Homogeneización de las series identificando puntos de cambio de la mismas y ajustándola con respecto a otra u otras series (estaciones de referencia) que comparta la misma señal climática, y 3) Calculo de 67 índices recomendados por 9 sectores (salud, agricultura, recurso hídrico, costas, reducción de desastres, energía, pesca, silvicultura/GEI y Criósfera). Para lo anterior, algunos investigadores desarrollaron 3 librerías escritas en r: inqc, climatol y climpack respectivamente; metodología adoptada en este ejercicio para obtener los indicadores de cambio climático.

Según lo expuesto por las directrices de la Organización Meteorológica Mundial ([OMM, 2017](#)), la homogeneización es un paso en el procesamiento y análisis de datos climáticos, y es un requisito importante en el cálculo de los productos nacionales de vigilancia del clima. El proceso de evaluar y reducir el efecto de los cambios no climáticos se conoce como homogeneización. Una de las principales dificultades para evaluar con precisión las tendencias a largo plazo es que los datos obtenidos con instrumentos, como los relativos a las precipitaciones y las temperaturas pueden verse influenciados por factores no climáticos a lo largo del tiempo. Entre esos factores no climáticos se encuentran la reubicación de las estaciones de observación, el cambio de exposición debido a cambios en el entorno que rodea la estación y nuevas prácticas de observación como la automatización de las observaciones. Si todo esto no se tiene en cuenta, pueden producirse alteraciones de origen no climático en los datos que afecten a las tendencias estimadas a largo plazo. ([OMM, 2017](#)).

El tema de control de calidad de los datos, estimación de datos faltantes y homogeneización de series de variables meteorológicas se ha trabajado en la Subdirección de Meteorología del Ideam desde hace varios años donde se han explorado diferentes enfoques. Inicialmente [Bernal, et. al. \(2010\)](#) presentaron para series de tiempo mensuales de precipitación una metodología de i) estimación de datos faltantes bajo el enfoque de valores atípicos aditivos-modelos ARIMA, ii) detección de cambios en el promedio de las series empleando la prueba de razón de verosimilitud de Worsley y iii) ajuste de las series heterogéneas identificando las estaciones vecinas y la perspectiva de dobles masas en tres regiones climatológicas. Con base en el trabajo anterior, [Barrios \(2014\)](#) ejecutó la misma metodología para estaciones convencionales que estuvieran emplazadas

en ecosistemas de páramo o en humedales. Después, el trabajo de Sorza (2016) se enfocó en el control de calidad de las series de tiempo diarias, proponiendo varios métodos de estimación de los datos faltantes y realizando una revisión de diferentes metodologías para la homogeneización de series a escala diaria. El trabajo realizado por Giraldo & Martínez (2016) se centró en proponer métodos de estimación desde el enfoque geoestadístico para series diarias de precipitación y temperatura. Finalmente, en el año siguiente, Martínez (2017) trabajó sobre la estimación de datos faltantes y homogenización de las series de tiempo mensuales de precipitación para el periodo 1980 - 2016 desde dos enfoques: uno temporal y otro espacial y, mediante el test de McCuen se evaluaron las estimaciones de los dos métodos.

La selección de los 67 indicadores de cambio climático que se encuentran en <https://climpack-sci.org/indices/> mantiene aquellos índices que están en RClimdex y los adicionales fueron escogidos en reuniones de expertos a partir de las investigaciones realizadas por McKee, T.B., et. al. (1993), Karl, T.R., et. al. (1999), Peterson, T.C., et. al. (2001), Zhang, X., et. al. (2005), Vicente-Serrano, et. al. (2010), WMO (2012), Nairn, J.R. & Fawcett, R.G. (2013), y Perkins, S.E. & Alexander, L.V. (2013). A continuación, se presenta la lista final de los indicadores o índices de cambio sobre los cuales se calculan sus tasas de cambio a nivel anual:

- FD - Número de días con heladas
- TNlt₂ - Número de días con temperaturas por debajo de los 2°C
- TNltm₂ - Número de días con temperaturas por debajo de los -2°C
- TNltm₂₀ - Número de días con temperaturas por debajo de los -20°C
- ID - Número de días con formación de hielo
- SU - Número de días cálidos
- TR - Número de noches tropicales
- GSL - Longitud del periodo de crecimiento
- TXx - Valor máximo mensual de la temperatura máxima diaria
- TXn - Valor mínimo mensual de la temperatura máxima diaria
- TNn - Valor mínimo mensual de la temperatura mínima diaria
- TMm - Temperatura media del aire.
- TXm - Temperatura máxima media del aire.
- TNm - Temperatura mínima media del aire.
- TN10_p - Porcentaje de días en que temperatura mínima (TN) es < percentil 10
- TX10_p - Porcentaje de días en que la temperatura máxima (TX) es < percentil 10
- TN90_p - Porcentaje de días en que la temperatura mínima diaria (TN) es > percentil 90
- TX90_p - Porcentaje de días en que la temperatura máxima diaria (TX) es > percentil 90.
- WSDI - Índice de duración de ola de calor
- WSDId - WSDI definido por el usuario. Número anual de días que contribuyen a eventos en los que d o más días consecutivos experimentan $TX > \text{percentil } 90$.
- CSDI - Índice de duración de la ola de frío.
- CSDId - CSDI definido por el usuario. Número anual de días que contribuyen a eventos en los que d o más días consecutivos experimentan $TN < \text{percentil } 10$.
- TXgt50_p - Porcentaje de días con temperatura por encima de la mediana.
- TX95t - Umbral de día muy cálido
- TMge₅ - Temperatura mayor o igual a 5 °C
- TMLt₅ - Temperatura menor o igual a 5 °C.
- TMge₁₀ - Temperatura mayor o igual a 10 °C
- TMLt₁₀ - Temperatura menor o igual a 10 °C
- TXge30 - TX mayor o igual a 30 °C
- TXge35 - TX mayor o igual a 35 °C
- TXdTnd - Número consecutivo de días y noches calurosos definido por el usuario.

- HDDheatn - Grados día de calefacción (Medida de demanda de energía para aumentar la temperatura al interior de una edificación)
- CDDcoldn - Grados día de refrigeración (Medida de demanda de energía para disminuir la temperatura al interior de una edificación)
- GDDgrown - Grados día de crecimiento (Medida de acumulación de calor usado para predecir la tasa de crecimiento de una planta)
- DTR - Rango de temperatura diario
- Rx1day – Número de días con precipitación mensual superior a 1mm
- Rx5day - Número de días con precipitación mensual superior a 5 mm
- RXdday - Número de días con precipitación mensual superior a un valor definido por el usuario.
- SPI - Medida de "sequía" utilizando el Índice de Precipitación Estandarizado en escalas de tiempo de 3, 6 y 12 meses
- SPEI - Índice de evapotranspiración de precipitación estandarizada. Medida de "sequía" utilizando el Índice de Evapotranspiración de Precipitación Estandarizado en escalas de tiempo de 3, 6 y 12 meses
- SDII - Índice de intensidad de precipitación simple
- R10mm - Recuento anual de días cuando PRCP $\geq$ 10 mm
- R20mm - Conteo anual de días cuando PRCP $\geq$ 20 mm
- Rnnmm - Conteo anual de días cuando PRCP $\geq$ nn mm, donde nn es un umbral definido por el usuario.
- CDD - Duración máxima del período seco
- CWD - Duración máxima del período húmedo
- R95p - PRCP total anual cuando RR > percentil 95
- R99p - PRCP total anual cuando RR > percentil 99
- PRCPTOT -Precipitación total anual
- TXbdTNbd - Número consecutivo de días y noches fríos definido por el usuario
- HWN (EHF/Tx90/Tn90) - Número de ola de calor (HWN) definido por el factor de exceso de calor (EHF), el percentil 90 de TX o el percentil 90 de TN
- HWF (EHF/Tx90/Tn90) - Frecuencia de la ola de calor (HWF) definida por el factor de exceso de calor (EHF), el percentil 90 de TX o el percentil 90 de TN
- HWD (EHF/Tx90/Tn90) - Duración de la ola de calor (HWD) definida por el Factor de exceso de calor (EHF), el percentil 90 de TX o el percentil 90 de TN
- HWM (EHF/Tx90/Tn90) - Magnitud de la ola de calor (HWM) definida por el factor de exceso de calor (EHF), el percentil 90 de TX o el percentil 90 de TN
- HWA (EHF/Tx90/Tn90) - Amplitud de la ola de calor (HWA) definida por el factor de exceso de calor (EHF), el percentil 90 de TX o el percentil 90 de TN
- CWN_ECF_ECF - Frecuencia de la ola de frío (HWF) definida por el factor de exceso de frío (ECF).
- CWD_ECF - Duración de la ola de frío (CWD) definida por el factor de exceso de frío (ECF)
- CWA_ECF - Amplitud de la ola de frío (CWA) definida por el factor de exceso de frío (ECF)

No obstante, a pesar de que para esta nota técnica se calcularon todos los índices, solo se presentan las tendencias anuales para algunos de ellos; en particular para aquellos que son comunes a la estructura de los datos que se registran a nivel nacional y no en lugares particularizados. A manera de ejemplo, no se presenta el FD porque temperaturas por debajo de 0°C ocurre en zonas de alta montaña, o TXge35 porque al contrario de lo anterior, las temperaturas máximas que exceden los 35°C ocurren mayormente en zonas como la región Caribe, los Llanos Orientales e incluso a lo largo del Valle de Magdalena en la región Andina. Tampoco se presentan indicadores especializados para los sectores. Los resultados finales apuntan al análisis de la tendencia anual de los eventos extremos de precipitación y temperatura para el período 1981-2020 sobre 228 estaciones con longitudes de series "aceptables" para el período considerado.

2. DATOS Y METODOLOGÍA

Con el fin de calcular los indicadores de cambio climático, inicialmente se descargaron de la base de datos del Ideam (DHIME) los datos diarios disponibles de precipitación y de temperatura máxima y mínima de 228 estaciones meteorológicas (Ver Fig.1), los cuales compartieron un número importante de datos dentro del período comprendido entre 1981 y 2020. Una vez realizado lo anterior, se convirtieron dichos datos a formato *RClimDex* como se muestra a continuación:

2003	4	27	5.4	31.2	23.6
2003	4	28	7.2	30.6	23.8
2003	4	29	44	33	24.2
2003	4	30	4.2	33.2	23.0
2003	5	1	0.2	31.2	23.2
2003	5	2	92.6	33.4	23.8
2003	5	3	49.2	34.4	23.8
2003	5	4	0.3	27.6	23.2
2003	5	5	31.2	33.6	23.6
2003	5	6	4.6	28.4	23.6
2003	5	7	58.1	34	23.6
2003	5	8	12.1	33.2	23.0
2003	5	9	28.8	24.8	23.4
2003	5	10	53.1	32.8	23.0
2003	5	11	70.8	30.3	23.6
2003	5	12	21.6	29.6	23.6
2003	5	13	22.9	32.6	23.6

Ello con el fin de realizar los procesos de control de calidad, homogeneización y cálculo de indicadores de cambio climático. Así mismo, se preparó otro archivo con la tabla que integra la ubicación geográfica de las 228 estaciones de la siguiente forma (a manera de ejemplo se presentan las 6 primeras líneas):

```
CODIGO,ESTACION,LAT,LON,ELEVACION,PAIS,
11045010,Apto El Carano,5.69056,-76.64386,53,Colombia
12015070,Apto Los Cedros,7.81667,-76.71783,19,Colombia
12045020,Cristo Rey,9.07217,-76.22550,15,Colombia
13035501,Apto Los Garzones,8.82583,-75.82514,20,Colombia
13075010,Chima,9.15075,-75.62208,20,Colombia
```

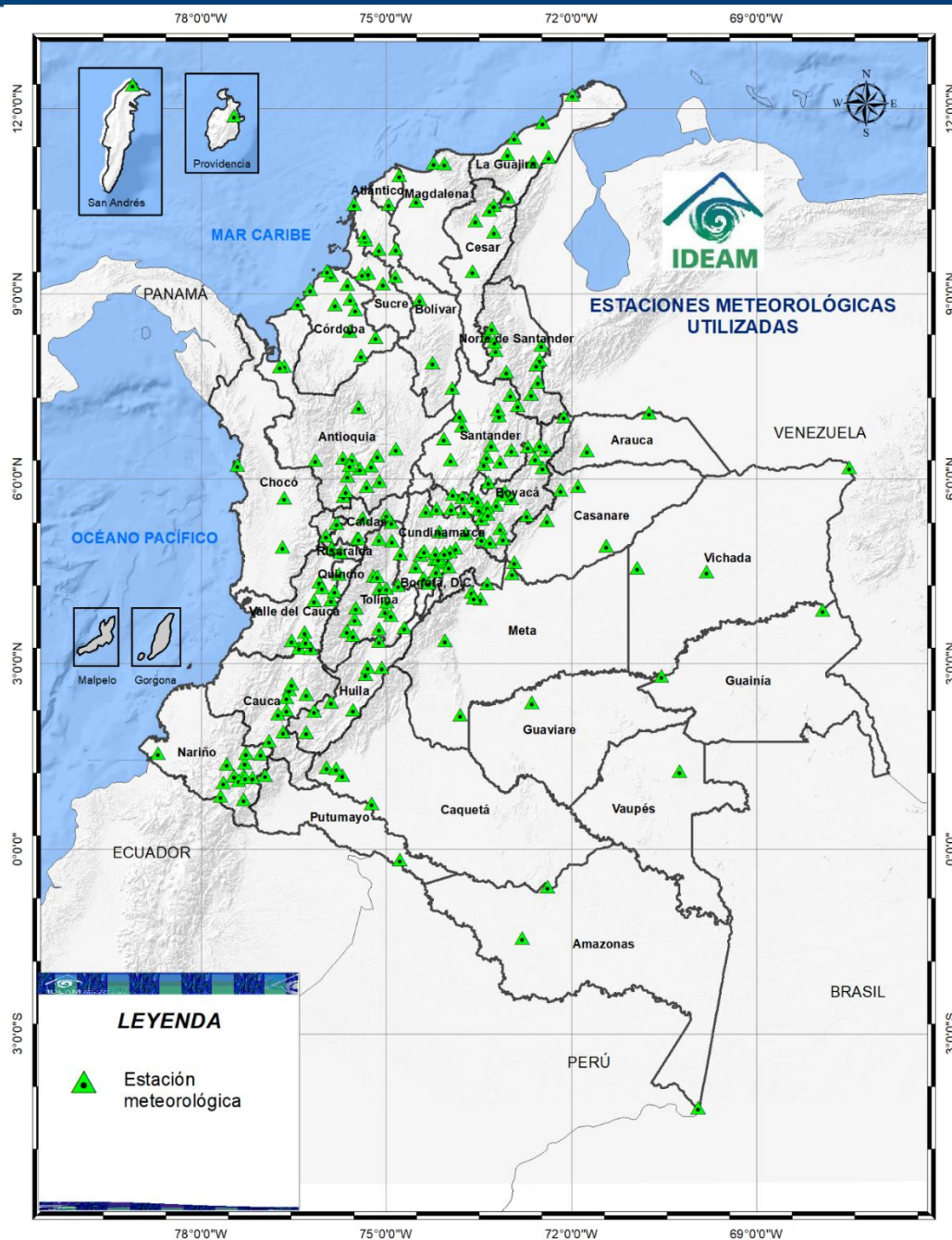


Figura 1. Mapa de las 228 estaciones utilizadas

La Fig. 2, presenta un resumen de los datos diarios utilizados; la cual muestra que para la década de los 80s hubo menor disponibilidad de datos que para el resto del período analizado; evidenciando otra situación en la que se aprecia que, aproximadamente a partir de 1995 existe en promedio por estación meteorológica, alrededor de un 63% de datos diarios disponibles de precipitación y de un 54% para temperaturas (mínima y máxima) diarias. Finalmente, los histogramas presentan la frecuencia de los registros para el conjunto de las 228 estaciones consideradas.

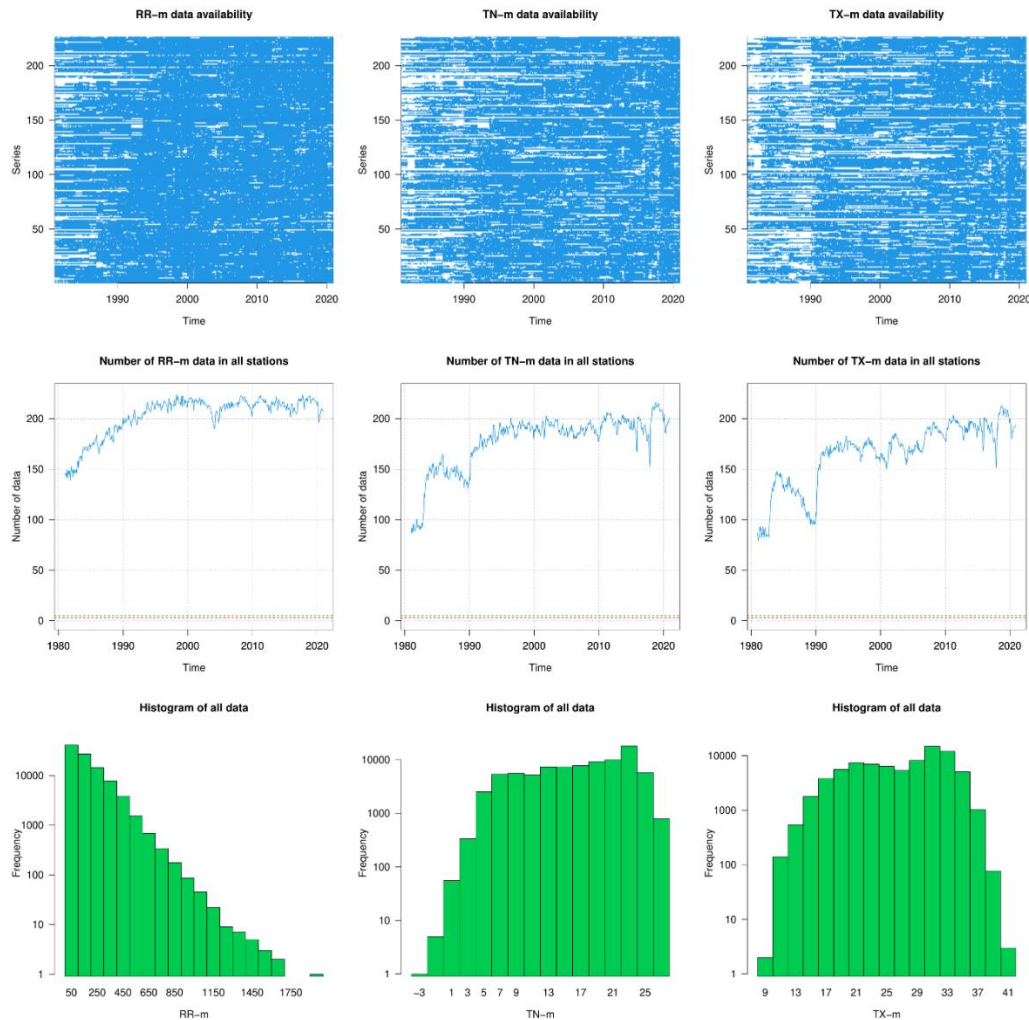


Figura 2. Serie de datos utilizados (parte superior). Promedio de datos utilizados por año en el conjunto de estaciones utilizadas (zona media). Histograma de frecuencias de datos diarios correspondientes a las estaciones utilizadas (parte inferior) para precipitación diaria (RR), temperatura mínima diaria (TN) y temperatura máxima diaria (TX).

Antes de iniciar todo el proceso, en el espacio de trabajo se crearon 2 directorios de trabajo, **data** y **code**; en el primero de ellos se ubicaron los archivos de todas las estaciones con los datos en formato *RClimDex* junto con el archivo de ubicación de las estaciones meteorológicas anteriormente descrito, y en el segundo se ubicaron 3 códigos en R suministrados por la OMM: *inqcRClimdex.R*, *rclimdex2climatol.R* y *climog.R*.

2.1. Control de calidad (INQC)

En esta parte de la metodología se empleó la herramienta de R conocida como INQC ([Aguilar & Skrynyk, 2021](#)), ya que permite realizar control de calidad (QC) de series temporales climatológicas diarias con una serie de funciones que proporcionan una amplia gama de pruebas de control de calidad para casi todos los tipos de errores en los datos diarios y para casi todas las variables climáticas como la temperatura del aire, la precipitación, la presión atmosférica, etc. Para este caso en particular, se utilizaron las siguientes funciones, una vez ejecutadas las siguientes líneas de código:

```
source('inqcRclimindex.R')  
transform()  
inqc()  
reform(2,2,1)
```

En pocas palabras, la función **transform** convierte los datos de formato *Rclimindex* a formato ECA&D; posteriormente la función **inqc** realiza el control de calidad y una vez hecho esto, la función **reform** convierte de nuevo de formato ECA&D a *Rclimindex* con el correspondiente tratamiento de los niveles de error para la temperatura máxima, mínima (2) y la precipitación (1).

Resultado de ello y particularmente de la función **inqc**, son salidas donde se le informa al usuario las fechas con posibles inconsistencias de los datos dados por:

- Datos redondeados.
- Datos dudosos.
- Datos duplicados.
- Datos repetidos de forma continua demasiadas veces.
- Datos extremadamente grandes.
- Datos extremadamente pequeños.
- Datos atípicos diarios con respecto al rango intercuartil.
- Valores de temperatura mínima superiores a valores de temperatura máxima.
- Valores de temperatura máxima inferiores a valores de temperatura mínima.

Datos que deben ser corregidos por el usuario aceptándolos, rechazándolos y reemplazándolos como un faltante (-99.9), o finalmente corrigiéndolos. Muchas veces un dato que puede parecer atípico para inqc podría ser no corregido o cambiado por el experto debido a eventos extremos **verificados** como el paso de huracanes, frentes fríos o cualquier sistema de escala sinóptica o formación de sistemas de mesoescala y/o microescala que pudiesen haber ocurrido.

2.2. Homogeneización (paquete climatol y la función homogen)

En este contexto, el proceso de calidad del dato meteorológico que se desarrolla en la Subdirección de Meteorología de Ideam realiza un análisis de homogeneidad y complementación sobre las series temporales diarias de las variables meteorológicas de precipitación acumulada y temperatura del aire. Este proceso consiste en realizar una prueba de homogeneidad normal estándar (SNHT, por sus siglas en inglés) para detectar puntos de cambio en los niveles de las series temporales. En el caso de rechazarse la prueba, se procede al proceso de homogeneización, el cual se realiza mediante la metodología propuesta por [Guijarro \(2018\)](#). Ésta es una metodología de homogeneización relativa, es decir, se realiza con base en información de series cercanas correlacionadas. La complementación se rige bajo el mismo principio de realizar la estimación con base en los registros de estaciones cercanas mediante un promedio ponderado por la distancia y el procesamiento de homogeneización se realiza mediante la función `homogen()` del paquete `climatol` de R ([Guijarro, 2023](#)).

Sin embargo, para realizar esta tarea, es conveniente identificar grupos de estaciones que comparten la misma señal climática a través de un análisis de clúster. Para dicho análisis, la

metodología propone usar un método de agrupación no jerárquica llamado método de k-medias el cual se puede consultar en detalle en los trabajos de [Peña \(2002\)](#) y [Wilks \(2011\)](#).

Para seleccionar el número de grupos óptimos se realiza un análisis gráfico de la suma de cuadrados dentro de los grupos (SCDG). El análisis gráfico consiste en varios pasos: primero se ejecuta sobre las variables estandarizadas el método k-medias de forma iterativa iniciando desde una partición de un grupo hasta una partición definida por el analista; y segundo, con cada partición se calcula la SCDG, que es equivalente a la suma ponderada de las varianzas de las variables en los grupos; finalmente, se grafica el número de clústeres frente a la SCDG. Cuando la pendiente de la curva empieza a tender a cero es un indicador del número apropiado de grupos (Ver Fig. 3).

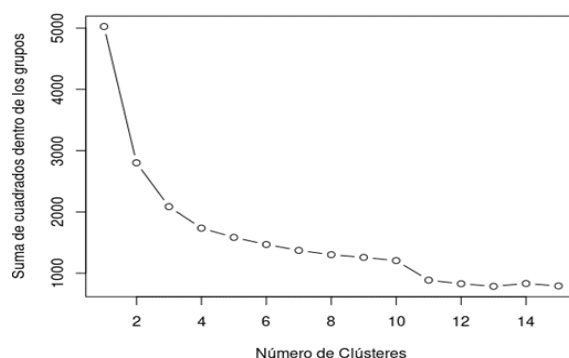


Figura 3. Análisis gráfico de SCDG

Con la partición óptima obtenida mediante el método k-medias, se obtiene entre otros, las coordenadas del centro de clase y la asignación de cada punto a su respectivo grupo.

Para la homogenización, el método usado por climatol::homogen() es de homogeneización relativa, es decir, se realiza con base en información de series cercanas, que con la clasificación previa, se garantiza que tengan un grado aceptable de correlación. El método de climatol::homogen() se basa en lo propuesto por [Paulhus & Kohler \(1952\)](#), donde se estiman precipitaciones diarias a través de promedios de valores cercanos, normalizados mediante división por sus respectivas precipitaciones medias. Climatol::homogen() ofrece tres tipos de normalización y su selección depende de la variable de análisis.

1. Restar la media: $x = X - m_x$
2. Dividir por la media: $x = X/m_x$
3. Estandarizar: $x = (X - m_x)/s_x$

Donde m_x y s_x son la media y la desviación estándar de una serie X .

Según [Guijarro \(2023\)](#), cuando se trabaja con variables limitadas por cero y con una distribución de probabilidad sesgada (como la precipitación o la velocidad del viento), la normalización por proporción respecto a la media es preferible a la estandarización. Para la variable temperatura se sugiere la estandarización usual, es decir, restar por la media y dividir por la desviación estándar.

Una vez normalizadas las series (de análisis y cercanas), se procede a estimar los datos de toda la serie de análisis con base en los datos de las series cercanas. Esto se hace mediante la siguiente expresión:

$$\hat{y} = \frac{\sum_{j=1}^{j=n} w_j x_j}{\sum_{j=1}^{j=n} w_j}$$

Donde $\hat{y}$ es un dato estimado mediante los correspondientes n datos x_j más próximos disponibles en paso temporal, y w_j es el peso asignado a cada uno de ellos.

Las series estimadas se denominan series de referencia, las cuales en contraste con las series observadas (normalizadas) permiten obtener series de anomalías restando los valores estimados a los observados. Las series de anomalías permiten:

- Realizar control de calidad de las series y eliminar aquellas anomalías que superen un umbral prefijado.
- Comprobar la homogeneidad mediante la aplicación del Standard Normal Homogeneity Test (Alexandersson, 1986).

El paquete climatol basa la detección estadística de rupturas en la homogeneidad de la serie con la prueba de homogeneidad normal estándar (SNHT, por sus siglas en inglés), con base en la estadística $T(k)$; dónde Alexandersson (1986) describe un estadístico $T(k)$ para comparar la media de los primeros k años del registro con la de los últimos $n - k$ años (Kahya, E. et al., 2016):

$$T(k) = k\bar{z}_1^2 + (n - k)\bar{z}_2^2 \text{ para } k=1, \dots, n$$

Dónde,

$$\bar{z}_1 = \frac{1}{k} \frac{\sum_{i=1}^k Y_i - \bar{Y}}{s}; \bar{z}_2 = \frac{1}{n - k} \frac{\sum_{i=k+1}^n Y_i - \bar{Y}}{s}$$

Si un salto se detecta en el año K , entonces $T(k)$ alcanza un máximo cerca al año $k = K$. El estadístico T_0 de prueba está definido como:

$$T_0 = \max(T(k)) \text{ para } 1 \leq k < n$$

Por lo que la hipótesis nula se rechazaría si T_0 está por encima del umbral definido, el cual depende del tamaño de la muestra.

Esta prueba se aplica a la serie de anomalías entre las series de interés y las series de referencia estandarizadas. Para mayor efectividad en la identificación de los cambios en la media, la prueba se aplica a la serie de anomalías en dos etapas:

- En ventanas de 120 términos avanzando en pasos de 60 términos.
- En toda la serie.

Cuando los máximos valores SNHT de las series son mayores que un umbral predefinido, la serie se divide por el punto de máximo SNHT, pasando todos los datos antes del cambio a una nueva serie que se añade a las demás con las mismas coordenadas, pero añadiendo un sufijo numérico al código y al nombre de la estación. Este procedimiento se realiza de forma iterativa (como se muestra en la Fig. 4), partiendo solo las series con mayores valores SNHT en cada ciclo, hasta que no se encuentren más inhomogeneidades. Concretamente, dependiendo de los cambios en nivel detectados, se divide la serie y a cada uno de estos fragmentos se le ajusta una serie homogenizada con media constante.

Para las series de las variables meteorológicas analizadas, se desarrolla el procedimiento que se expone a continuación. Este empieza después de haber realizado el análisis de clasificación donde se han definido grupos de estaciones cercanas en términos de distancia y semejantes desde el punto de vista de los promedios mensuales multianuales.

Dado que las series de escala diaria presentan una alta variabilidad, [Guijarro \(2018\)](#) recomienda homogeneizar primero las series agregadas a escala mensual, para obtener una mejor eficiencia en la detección de inhomogeneidades y no introducir saltos asociados a cambios característicos de la escala sinóptica. En este sentido, en una primera etapa se realiza un agregado mensual de las precipitaciones y temperaturas diarias siguiendo los lineamientos de la Organización Meteorológica Mundial ([OMM, 2017](#)), donde se calcula un total (precipitación) o promedio (temperatura) mensual si se cuenta mínimo con 20 datos diarios. Sobre las series mensuales se realiza una primera ejecución de la función `homogen()` en modo exploratorio con el fin de determinar los parámetros específicos para la homogeneización ([Guijarro, 2023](#)).

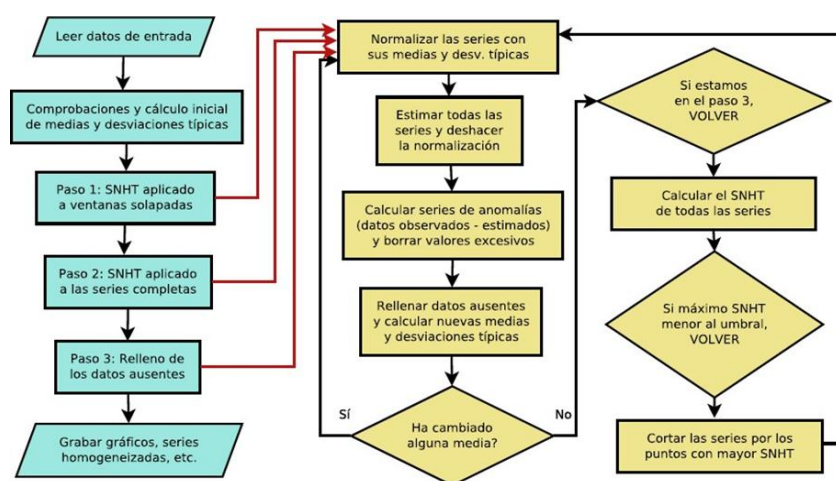


Figura 4. Diagrama de flujo del funcionamiento de Climatol, mostrando sus procesos iterativos. Fuente: [Guijarro \(2023\)](#)

La Fig. 5 presenta el gráfico de anomalías el cual permite identificar los valores máximos de SNHT calculados cuando se hace la prueba sobre ventanas escalonadas (línea vertical verde), y cuando se hace sobre la serie completa (línea negra). El documento gráfico de la corrida exploratoria termina con histogramas de anomalías estandarizadas y SNHT de las series finales, y una figura que indica su calidad o singularidad.

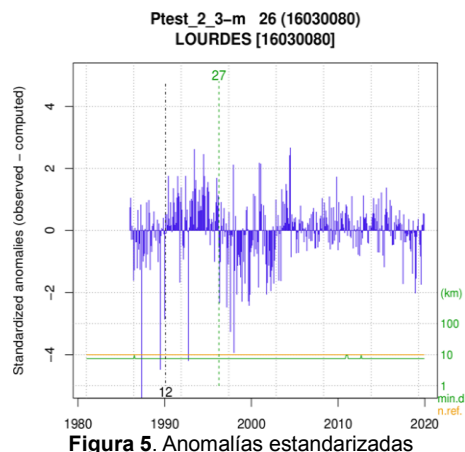


Figura 5. Anomalías estandarizadas

El histograma de anomalías (Fig. 6) ayuda en la elección de umbrales adecuados para rechazar datos muy anómalos, suponiendo que son errores y pueden descartarse. Como los datos que se utilizan en esta etapa han pasado por un control de calidad previo, con el análisis del histograma de anomalías se busca determinar los umbrales adecuados para no descartar ningún dato.

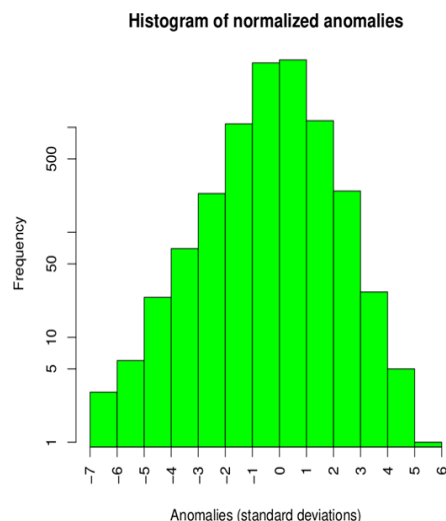


Figura 6. Histograma de anomalías normalizadas

Con el fin de realizar lo anterior, y siguiendo las recomendaciones de [Guijarro \(2023\)](#) se corrigió el archivo stations.txt que se generó en la carpeta data_qc en el proceso de control de calidad de datos (INQC.r) agregando QC_ al inicio y .txt al final del código de las estaciones, tal como se ve en el nombre del archivo de cada estación en la carpeta data_qc y se dió nuevo nombre (stations.csv)

```
CODIGO,ESTACION,LAT,LON,ELEVACION,PAIS,X
QC_11045010.txt,Apto El Carano,5.69056,-76.64386,53,Colombia,NA
QC_12015070.txt,Apto Los Cedros,7.81667,-76.71783,19,Colombia,NA
QC_12045020.txt,Cristo Rey,9.07217,-76.2255,15,Colombia,NA
QC_13035501.txt,Apto Los Garzones,8.82583,-75.82514,20,Colombia,NA
QC_13075010.txt,Chima,9.15075,-75.62208,20,Colombia,NA
```

Una vez instalada la librería climatol y ubicados en la carpeta de trabajo data_qc se procedió en R a realizar las siguientes instrucciones:

```
library('climatol')
source('../code/rclimdex2climatol.R')
```

Posteriormente, se convierten datos de formato RClimDex a climatol

```
# 1 RR Precipitación
rclimdex2climatol('stations.csv',1,chr cod = c(4,11), varcli = 'RR', sep = '\t',anyi = NA, anyf = NA, mis = -99.9, mindat = 365, header = TRUE)
# 2 TX Temperatura Máxima
rclimdex2climatol('stations.csv',2,chr cod = c(4,11), varcli = 'TX', sep = '\t',anyi = NA, anyf = NA, mis = -99.9, mindat = 365, header = TRUE)
# 3 TN Temperatura Minina
```

```
rclimdex2climatol('stations.csv',3,chrco = c(4,11), varcli = 'TN', sep = '\t',anyi = NA, anyf = NA, mis = -99.9, mindat = 365, header = TRUE)
```

donde la variable kvar es igual a:

- 1 para RR Precipitación
- 2 para TX Temperatura Máxima
- 3 para TN Temperatura Minina

Debido a que la fecha de inicio y fin de los archivos diarios es diferente para cada una de las estaciones, se fijó el periodo de cálculo para 1981-2000:

```
# Fijamos un periodo de trabajo si se requiere
datsubset('RR',1971,2023,1981,2020)
datsubset('TX',1971,2023,1981,2020)
datsubset('TN',1971,2023,1981,2020)
```

De acuerdo con [Guijarro \(2023\)](#), “La función *homogen* calcula la frecuencia de los datos (subdiarios, diarios, mensuales, bimestrales, trimestrales, semestrales o anuales) a partir de la cantidad de datos presentes en el periodo comprendido entre los años inicial y final. Pero como se mencionó anteriormente, la elevada variabilidad de los datos diarios (o subdiarios) dificulta mucho la detección de cambios en la media, entonces, la homogeneización directa de dichos datos no está aconsejada, y por eso el ejemplo anterior con la variable *Prec* (en este caso RR) genera un error aconsejando homogeneizar primero sus datos mensuales cuyos ficheros se obtienen fácilmente mediante la función *dd2m*. No obstante, antes de generar los datos mensuales conviene comprobar la calidad de los diarios, por lo que se usó la opción *onlyQC=TRUE*”

```
homogen('RR',1981,2020,onlyQC=T)
homogen('TX',1981,2020,onlyQC=T)
homogen('TN',1981,2020,onlyQC=T)
```

lo cual genera análisis como los presentados en las figs. 5 y 6. Posteriormente se procedió a obtener los archivos de datos mensuales y a homogeneizar sus series.

```
dd2m('RR',1981,2020,valm=1)
dd2m('TX',1981,2020,valm=2)
dd2m('TN',1981,2020,valm=2)
```

dónde *valm* indica el valor mensual a calcular, 1 para sumas y 2 para promedios. 3, 4, 5 están reservados para valores máximos, mínimos y la desviación estándar.

```
# homogeneización mensuales
homogen('RR-m',1981,2020,std=1)
homogen('TX-m',1981,2020)
homogen('TN-m',1981,2020)
```

El tipo de normalización que se recomienda aplicar a la precipitación es restar la media. A continuación, se realizó la homogeneización teniendo en cuenta la lectura del archivo que indica los puntos de quiebre (*metad=TRUE*), además de indicarle el número máximo de datos próximos a usar para estimar los de la serie problema (*nref*). De acuerdo con [Guijarro \(2023\)](#), “Por defecto se utilizarán hasta 10 (si existen en cada paso de tiempo considerado) en las dos primeras etapas, y hasta 4 en la última, pero a veces puede convenir cambiar estos valores. Por ejemplo, en la

homogeneización de precipitaciones diarias, usar 4 datos de referencia suavizará los datos estimados, con lo que aumentará el número de días de lluvia y disminuirá los valores máximos. Eso se evitará fijando **nref=1**, aunque un valor muy alto de la serie más próxima puede producir uno demasiado elevado en la serie problema si la precipitación media es mucho mayor de la de la serie vecina". De no especificar algo [Guijarro \(2023\)](#) en su manual publicado en el CRAN de R expresa que *nref* es el número máximo de referencias para la estimación de datos [por defecto, 10 en las etapas de detección y 4 en los ajustes finales de la serie].

```
# Ajuste de series por cambios detectados
homogen('RR',1981,2020,nref=1,metad=TRUE)
homogen('TX',1981,2020,metad=TRUE)
homogen('TN',1981,2020,metad=TRUE)
```

Una vez las series han sido homogeneizadas, de nuevo se convierten los datos de climatol a RClimDex y se salvan en otra carpeta (hoclm):

```
climatol2rclimdex('RR','TX','TN',1981,2020,header=FALSE,prefix='hoclm',dir='../hoclm',na='-99.9')
```

en dicha carpeta se obtienen los archivos en formato RClimDex para cada una de las estaciones homogeneizadas con la estructura *hoclm{código}.txt*

2.3. Cálculo de indicadores de cambio climático (climpack)

Como se mencionó en la parte introductoria, climpack es un programa escrito en R que calcula el cambio anual de indicadores de cambio climático. De los 67 índices que proporciona, para esta entrega se escogieron los siguientes 12 para los análisis finales:

- **TNm - Temperatura mínima media del aire:** La media diaria de la temperatura mínima del aire.
- **TMm - Temperatura media del aire:** La media diaria de la temperatura media del aire.
- **TXm - Temperatura máxima media del aire:** La media diaria de la temperatura máxima del aire.
- **TN10_p - Porcentaje de días en que temperatura mínima (TN) es < percentil 10:** Sea TN_{ij} la temperatura mínima diaria del día i en el período j y sea TN_{in10} el percentil 10 del día calendario centrado en una ventana de 5 días para un período base. El porcentaje de tiempo para el período base se determina dónde: $TN_{ij} < TN_{in10}$. Para evitar una posible falta de homogeneidad entre los períodos dentro y fuera de la base, el cálculo para el período base requiere el uso de un procedimiento de arranque. Los detalles se describen en [Zhang et al. \(2005\)](#).
- **TX90_p - Porcentaje de días en que la temperatura máxima diaria (TX) es > percentil 90:** Sea TX_{ij} la temperatura máxima diaria del día i en el período j y sea TX_{in90} el percentil 90 del día calendario centrado en una ventana de 5 días para el período base. El porcentaje de tiempo para el período base se determina donde $TX_{ij} > TX_{in90}$. Para evitar una posible falta de homogeneidad entre los períodos dentro y fuera de la base, el cálculo para el período

base requiere el uso de un proceso de arranque. Los detalles se describen en [Zhang, et al. \(2005\)](#).

- **DTR - Rango de temperatura diario:** Sean TX_{ij} y TN_{ij} la temperatura máxima y mínima diaria respectivamente en el día i en el período j . Si i representa el número de días en j , entonces:

$$DTR_j = \frac{\sum_{i=1}^I (TX_{ij} - TN_{ij})}{I}$$

- **WSDI - Índice de duración de ola de calor:** conteo anual de días con al menos 6 días consecutivos cuando TX es > percentil 90. Sea TX_{ij} la temperatura máxima diaria del día i en el período j y sea TX_{in90} el percentil 90 del día calendario centrado en una ventana de 5 días para el período base. Luego se suma el número de días por período donde, en intervalos de al menos 6 días consecutivos, $TX_{ij} > TX_{in90}$.
- **PRCPTOT - Precipitación total anual sobre días húmedos:** Sea RR_{ij} la cantidad de precipitación diaria en el día i en el período j , entonces:

$$PRCPTOT_j = \sum_{i=1}^I RR_{ij}.$$

- **R95p – precipitación total anual cuando RR > percentil 95:** Sea RR_{wj} la cantidad de precipitación diaria en un día húmedo ($RR \geq 1.0mm$) en el período i y sea RR_{wn95} el percentil 95 de la precipitación en días húmedos en el período 1961-1990. Si W representa el número de día húmedos, entonces:

$$R95_p = \sum_{\omega=1}^W RR_{\omega j} \text{ donde } RR_{\omega j} > RR_{wn95}$$

- **R99p – precipitación total anual cuando RR > percentil 99:** Sea RR_{wj} la cantidad de precipitación diaria en un día húmedo ($RR \geq 1.0mm$) en el período i y sea RR_{wn99} el percentil 99 de la precipitación en días húmedos en el período 1961-1990. Si W representa el número de día húmedos, entonces:

$$R99_p = \sum_{\omega=1}^W RR_{\omega j} \text{ donde } RR_{\omega j} > RR_{wn99}$$

- **CDD - Duración máxima del período seco: número máximo de días consecutivos con $RR < 1 mm$:** Sea RR_{ij} la cantidad de precipitación diaria en el día i en el período j . Cuente el mayor número de días consecutivos donde $RR_{ij} < 1 mm$.
- **CWD - Duración máxima del período húmedo: número máximo de días consecutivos con $RR \geq 1 mm$:** Sea RR_{ij} la cantidad de precipitación diaria en el día i en el período j . Cuente el mayor número de días consecutivos donde $RR_{ij} \geq 1 mm$.

Con el fin de realizar lo anterior, se preparó el archivo metadata lista.csv, el cual debe aparecer así (por default) y puede ser ubicado en la carpeta donde están las salidas diarias homogeneizadas (hoclm):

```
station_file latitude longitude wsdin csdin Tb_HDD Tb_CDD Tb_GDD rxnday rnnmm txtn SPEI
hoclm11045010.txt 5.69056 -76.64386 3 3 18 18 10 3 30 7 24
hoclm12015070.txt 7.81667 -76.71783 3 3 18 18 10 3 30 7 24
hoclm12045020.txt 9.07217 -76.22550 3 3 18 18 10 3 30 7 24
hoclm13035501.txt 8.82583 -75.82514 3 3 18 18 10 3 30 7 24
hoclm13075010.txt 9.15075 -75.62208 3 3 18 18 10 3 30 7 24
hoclm13075020.txt 8.91389 -75.58222 3 3 18 18 10 3 30 7 24
```

Los valores para calcular los indicadores *wsdin*, *csdin*, *Tb_HDD*, *Tb_CDD*, *Tb_GDD*, *rxnday*, *rnnmm*, *txtn* y *SPEI* son datos por default que sugiere la aplicación, los cuales no afecta el cálculo de las tendencias anuales para los índices propuestos en este análisis.

A manera de comentario climpact se puede correr de 3 maneras:

- Opción 1: en la url <https://ccrc-extremes.shinyapps.io/climpact/> y siguiendo las instrucciones de la sección **Batch process stations**.
- Opción 2: Instalando R para Windows y siguiendo las instrucciones presentes en la url: <https://github.com/ARCCSS-extremes/climpact/> y, una vez abierto R, se procede a correr en 3 pasos:

```
source('server/climpact.master.installer.r')
library(shiny)
runApp()
```

Se abrirá un motor de búsqueda (Chrome, Firefox o el que tenga predeterminado) donde le solicitará el archivo metadata y los archivos homogeneizados de las estaciones y una vez termina el cálculo, generará un archivo denominado "lista" (puesto que el archivo metadata se llama lista.csv) con los indicadores de cambio climático en la sección **Batch process stations**.

- Opción 3: compilarlo en linux

```
sudo apt install libproj-dev
sudo apt install libudunits2-dev
```

Descargando climpact desde la url:

<https://github.com/ARCCSS/extremes/climpact/archive/master.zip> por ejemplo en la carpeta **code**; el cual al descomprimirla se crea la carpeta climpact-master, y una vez allí entrar a R y correr las siguientes líneas de código (similar al entorno Windows):

```
source('server/climpact.master.installer.r')
library(shiny)
runApp()
```

Si se presenta algún inconveniente, se deberá descargar e instalar:

```
wget https://cran.r-project.org/src/contrib/Archive/climdex.pcic/climdex.pcic_1.1-11.tar.gz
R CMD INSTALL climdex.pcic_1.1-11.tar.gz
```

Posteriormente se debe correr en una terminal la siguiente instrucción:

```
Rscript climpack.batch.stations.r {ruta de archivos de metadata y estaciones homogeneizadas}  
1981 2020 2
```

Dónde 1981 2020 es período de referencia y el último número (2) de la línea anterior es el número de núcleos que tenga disponible en su computadora para que el proceso corra en paralelo. En este caso se generará una carpeta denominada "lista" en la carpeta donde se haya corrido la línea anterior debido a que el archivo metadata se llama lista.csv.

Independiente de la forma de hacerlo, en la carpeta donde se ejecuta el climatol se generan las carpetas para cada estación con otras subcarpetas al interior, donde se pueden ver los resultados gráficos (carpeta **plot**) y los valores de tendencia anual de los indicadores de cambio climático (carpeta **trend**). Para algunas variables incluso determina estos cálculos de tendencia anual para los trimestres diciembre-enero-febrero (DJF), marzo-abril-mayo (MAM), junio-julio-agosto (JJA) y septiembre-octubre-noviembre (SON) y de los cuales se compartirán algunos resultados en el Anexo I.

A manera de ejemplo, en la Fig. 7, se presentan las salidas de la estación meteorológica Aeropuerto Eldorado (21205791) de la ciudad de Bogotá para algunos indicadores de cambio climático, donde se presentan las tendencias anuales de la temperatura mínima diaria (TNm), temperatura máxima diaria (TXm), temperatura media diaria (TMm), rango de temperatura diario (DTR), porcentaje de cambio anual del percentil 10 de la temperatura mínima (TN10p), porcentaje de cambio anual del percentil 90 de la temperatura máxima (TX90p), precipitación anual (PRCPTOT), porcentaje de cambio anual del percentil 95 de la precipitación (R95p), porcentaje de cambio anual del percentil 99 de la precipitación (R99p), índice de duración de la ola de calor (WSDI), duración máxima del período seco (CDD) y duración máxima de la racha húmeda (CWD).

Finalmente, en la interpolación de los mapas y con el propósito de obtener datos para las zonas en donde no se encuentran estaciones meteorológicas se trabajó con el método de interpolación IDW (Distancia Inversa Ponderada); el cual consiste en encontrar los valores de las condiciones meteorológicas suponiendo que a medida que aumenta la distancia a una estación meteorológica, disminuye la influencia del valor del dato y predomina el valor que se encuentre más cercano. (ESRI, 2023).

Teniendo en cuenta la distribución de las estaciones en el país y el método de interpolación, el tamaño de la celda (Output cell size) empleado para este ejercicio fue de 0.01 garantizando así que se cumpla con los valores mínimos para la información. Es importante señalar que la proyección cartográfica trabajada en este caso fue MAGNA SIRGAS.

Adicionalmente, a partir de éste proceso en ArcGIS se obtuvieron el promedio y la desviación estándar por departamentos, regiones naturales y regiones pluviométricamente homogéneas a fin de facilitar los análisis finales.

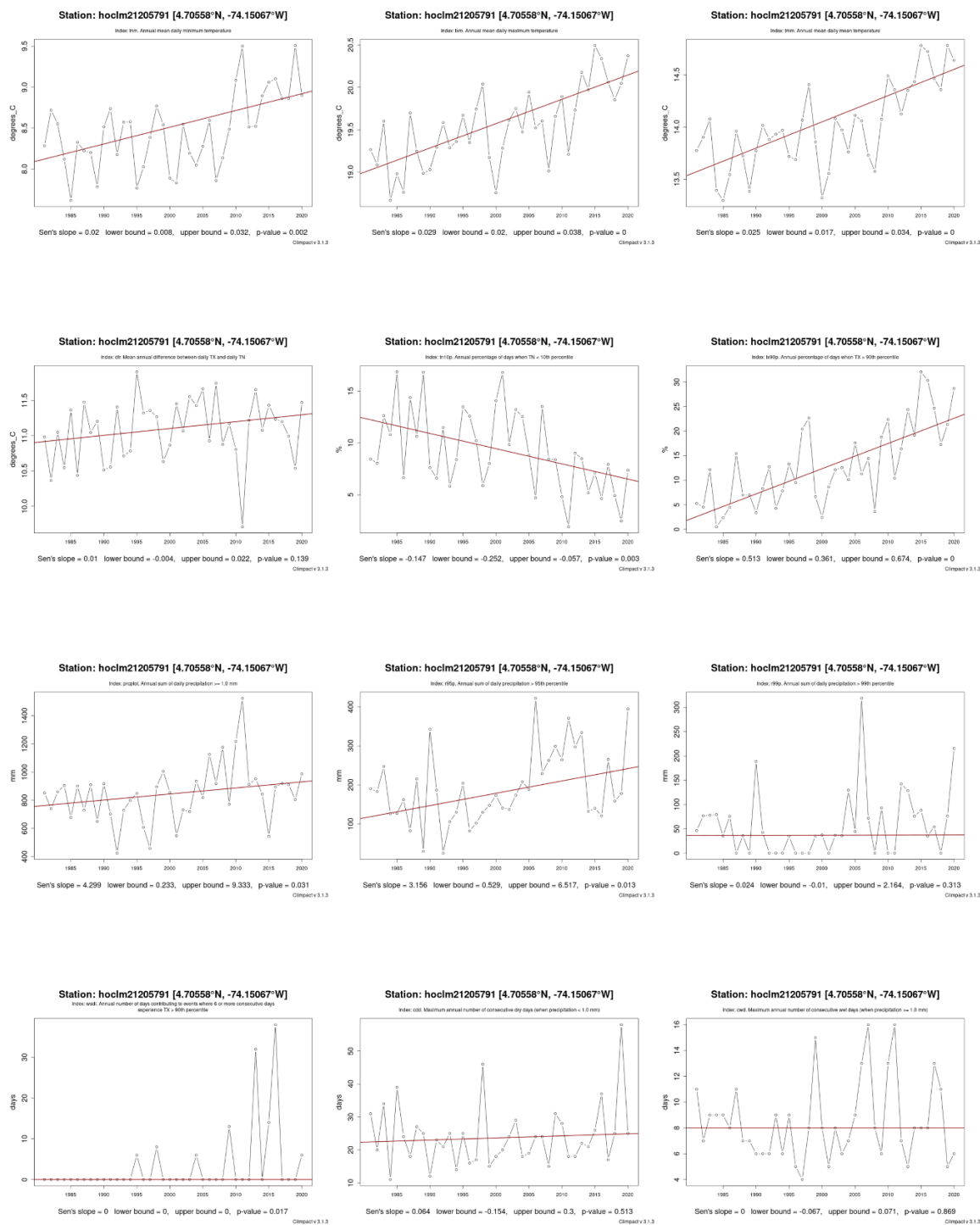


Figura 7. Algunos indicadores de cambio climático para la estación Aeropuerto Eldorado de Bogotá, generados con climact. De izquierda a derecha y de arriba abajo se presenta: TNm, TXm, TMm, DTR, TN10p, TX90p, PRCPTOT, R95p, R99p, WSDI, CDD y CWD.

3. ANÁLISIS Y RESULTADOS

Antes de entrar a la discusión de los resultados obtenidos con respecto a los indicadores de cambio climático analizados para las 228 estaciones consideradas, es importante señalar la potencia de la herramienta climatol previo a la etapa de la homogeneización de los datos con dicha librería de R.

Uno de los muchos resultados de ello se comparte en la Fig. 8 donde se presentan los correlogramas, dendogramas y los análisis de clúster obtenidos.

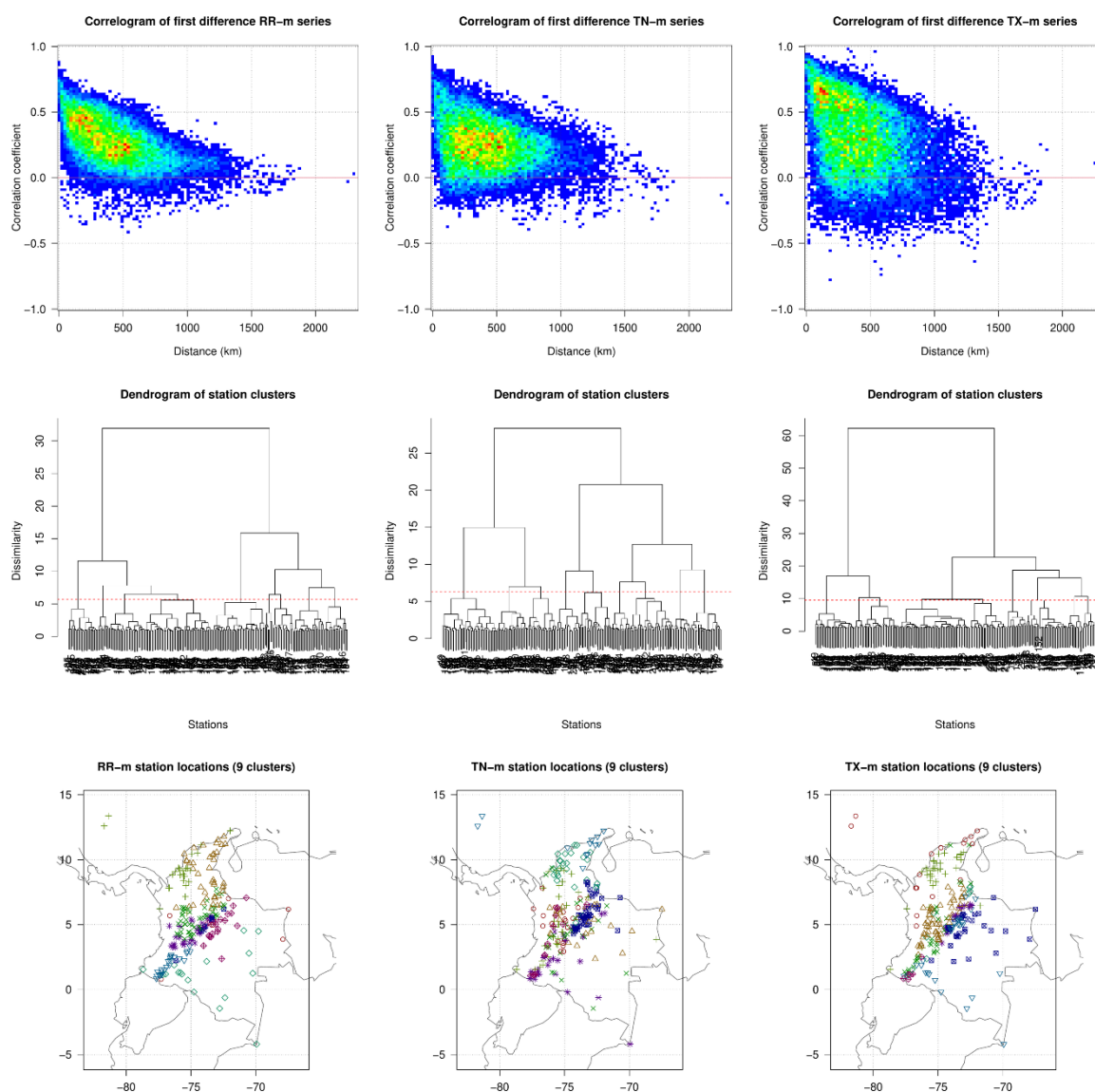


Figura 8. Correlogramas (Parte superior). Dendogramas (zona media). Análisis de clúster (zona inferior) para precipitación (RR), temperatura mínima (TN) y temperatura máxima (TX).

En particular los correlogramas muestran como la correlación (Pearson) disminuye con la distancia; algo muy positivo teniendo en cuenta que ello ayudó a identificar grupos de estaciones que comparten la misma señal climática en función de la distancia. Sin embargo, el dendograma, resultado del análisis de clúster, resolvió para el conjunto de 228 estaciones, 9 grupos que comparten dicha señal para las 3 variables meteorológicas consideradas (precipitación-RR, temperatura mínima-TN y temperatura máxima-TX); los cuales se encuentran espacializados en la parte inferior de la Fig. 8. Lo anterior significa que un valor agregado de esta nota técnica fue generar regiones climáticamente homogéneas; sin embargo, es importante reconocer otros esfuerzos por obtener este tipo de análisis a nivel nacional con distintos fines; entre ellos el que el [Ideam \(2015\)](#) publicó basado en la metodología de Análisis de Componentes Principales (varimax) realizado por [Guzmán, D., et al \(2012\)](#) y presentado en el Anexo 2.

A continuación, se comparten los resultados de calcular las tendencias anuales para 12 indicadores de cambio climático durante el período 1981-2020; no sin antes mencionar que, en general los valores de los indicadores relacionados con las temperaturas presentan un mayor grado de confianza ($p\text{-value} \leq 0.05$) que los asociados con la precipitación ($p\text{-value} > 0.05$) en la mayor parte de las estaciones analizadas. Por otro lado, a pesar de que climpack arroja resultados en tendencias anuales; los análisis se expresarán en tasas de cambio por década; similar a como IPCC lo hace en sus reportes.

Para finalizar, en el Anexo 1 se presentan los análisis estacionales para algunos de los indicadores de cambio climático.

- **TNm - Temperatura mínima media del aire:** En la Fig. 9 se presenta la tasa de cambio anual para este indicador de cambio climático donde los cálculos reflejaron que, para Colombia sus variaciones han oscilado entre $-0.16^{\circ}\text{C}/\text{década}$ y $+0.75^{\circ}\text{C}/\text{década}$; siendo Vaupés, Quindío y Guaviare, en promedio, los departamentos que más han experimentado una tendencia hacia el aumento en los valores de las temperaturas mínimas diarias del aire. En [Ruiz, J.F. & Melo, J.Y. \(2023\)](#), con el uso de climatol y series complementadas (caso que no fue considerado aquí) se estimó un valor promedio de $+0.29^{\circ}\text{C}/\text{década}$ para el territorio nacional; sin embargo, con esta metodología el valor se ubica en $+0.20^{\circ}\text{C}/\text{década}$.
- **TMm - Temperatura media del aire:** En la Fig. 10 se presenta la tasa de cambio anual para este indicador de cambio climático en el que los cálculos mostraron que, para Colombia sus variaciones han oscilado entre $+0.06^{\circ}\text{C}/\text{década}$ y $+0.55^{\circ}\text{C}/\text{década}$; siendo Quindío, Vaupés y Guainía, en promedio, los departamentos que más han experimentado una tendencia hacia el aumento en los registros de la temperatura media diaria del aire. Es relevante mencionar que esta variable es reconstruida por climpack con base en las distribuciones estadísticas de las temperaturas extremas. En [Ruiz, J.F. & Melo, J.Y. \(2023\)](#), con el uso de climatol y series complementadas (caso que no fue considerado aquí) se estimó un valor promedio de $+0.23^{\circ}\text{C}/\text{década}$ para el territorio nacional; sin embargo, con esta metodología se ubica en $+0.24^{\circ}\text{C}/\text{década}$.
- **TXm - Temperatura máxima media del aire:** En la Fig. 11 se presenta la tasa de cambio anual para este indicador de cambio climático donde los cálculos reflejaron que, para Colombia sus variaciones han oscilado entre $+0.10^{\circ}\text{C}/\text{década}$ y $+0.46^{\circ}\text{C}/\text{década}$; siendo Atlántico, Casanare y Santander, en promedio, los departamentos que más han experimentado una tendencia hacia el aumento en los registros de la temperatura máxima diaria del aire. En [Ruiz, J.F. & Melo, J.Y. \(2023\)](#), con el uso de climatol y series complementadas (caso que no fue considerado aquí) se estimó un valor promedio de $+0.25^{\circ}\text{C}/\text{década}$ para el territorio nacional; sin embargo, con esta metodología se ubica en $0.27^{\circ}\text{C}/\text{década}$.

- **TN10_p - Porcentaje de días en que temperatura mínima (TN) es < percentil 10:** En la Fig. 12 se presenta la tasa de cambio anual para este indicador de cambio climático y sus resultados evidencian que, para Colombia sus variaciones han oscilado entre -3.85%/década y +1.56%/década; no obstante, los promedios departamentales lo ubican entre -2.85%/década y -0.88%/década; indicando en general que, las noches se han tornado más cálidas con el tiempo; siendo Sucre, Cundinamarca y Bolívar, los departamentos que más han experimentado una tendencia hacia la disminución de los registros de la temperatura mínima diaria por debajo del percentil 10. El promedio nacional es de -0.18%/década.
- **TX90_p - Porcentaje de días en que la temperatura máxima diaria (TX) es > percentil 90:** En la Fig. 13 se presenta la tasa de cambio anual para este indicador de cambio climático manifestando que, para Colombia sus variaciones han oscilado entre +1.23%/década y +8.12%/década; no obstante, los promedios departamentales lo ubican entre +3.03%/década y +5.93%/década; indicando en general que los días se han tornado más cálidos con el tiempo; siendo Guainía, Vaupés y Vichada, los departamentos que más han experimentado una tendencia hacia el aumento en los registros de la temperatura máxima diaria por encima del percentil 90. El promedio a nivel nacional es del orden del +4.08%/década.
- **DTR - Rango de temperatura diario:** En la Fig. 14 se presenta la tasa de cambio anual para este indicador de cambio climático, donde los cálculos de los promedios departamentales para Colombia han oscilado entre -0.12°C/década y +0.13°C/década. Los únicos departamentos que presentaron una tendencia descendente de este indicador de cambio climático fueron Caquetá, Huila, Quindío y Amazonas, es decir que, en la mayoría de los departamentos del país, la diferencia diaria entre la temperatura máxima diaria y mínima diaria ha aumentado; particularmente en los departamentos de Cundinamarca, Sucre y Atlántico. El promedio a nivel nacional es del orden del +0.07°C/década.
- **WSDI - Índice de duración de ola de calor:** En la Fig. 15 se presenta la tasa de cambio anual para este indicador de cambio climático indicando que, para Colombia sus variaciones han oscilado entre +0.00día/década y +4.66día/década; siendo Cesar, La Guajira y Magdalena, los departamentos que, en promedio, más ha experimentado una tendencia hacia el aumento en las olas de calor. El promedio a nivel nacional es del orden del +0.22día/década.
- **PRCPTOT - Precipitación total anual sobre días húmedos:** En la Fig. 16 se presenta la tasa de cambio anual para este indicador de cambio climático y los cálculos evidenciaron que, para Colombia sus variaciones han oscilado entre +22,8mm/década±18.6mm/década; siendo Caldas, Chocó y Risaralda, en promedio, los departamentos que más han experimentado una tendencia hacia el aumento en las precipitaciones totales anuales; mientras que, Arauca, Cauca y Meta, los departamentos que han presentado una tendencia hacia la reducción de dicho indicador. En Ruiz, J.F. & Melo, J.Y. (2023), con el uso de climatol y series complementadas (caso que no fue considerado aquí) de 848 estaciones se estimó un valor promedio de 21.9mm/década para el territorio nacional.
- **R95_p – precipitación total anual cuando RR > percentil 95:** En la Fig. 17 se presenta la tasa de cambio anual para este indicador de cambio climático en la cual los cálculos reflejaron que, para Colombia sus variaciones han oscilado entre +5.89%/década±13.23%/década; sin embargo, en la mayoría de los departamentos este indicador revela que los eventos de lluvia fuerte han aumentado en la mayoría de los departamentos; excepto en Guainía, Atlántico, Sucre, Guaviare, Amazonas y Vaupés donde por el contrario han estado disminuyendo.

- **R99p – precipitación total anual cuando RR > percentil 99:** En la Fig. 18 se presenta la tasa de cambio anual para este indicador de cambio climático en donde los cálculos demuestran que, para Colombia sus variaciones han oscilado entre $+0.06\%/d\acute{e}cada \pm 0.22\%/d\acute{e}cada$; sin embargo, en la mayoría de los departamentos este indicador revela que los eventos de lluvia muy fuerte han aumentado excepto en Caquetá, Putumayo, Boyacá, Huila, Amazonas, Guainía, Vichada, Arauca y Vaupés donde por el contrario han estado disminuyendo.
- **CDD - Duración máxima del período seco:** En la Fig. 19 se presenta la tasa de cambio anual para este indicador de cambio climático constatando que, para Colombia sus variaciones han oscilado entre $+0.18d\acute{ı}as/d\acute{e}cada \pm 0.82d\acute{ı}as/d\acute{e}cada$. Tendencias hacia el aumento del período seco se obtuvieron en La Guajira, Magdalena, Sucre, Atlántico, Arauca, Córdoba, Casanare, Meta, Norte de Santander, Cesar, Cauca, Antioquia, Bolívar, Nariño, Santander, Huila, Cundinamarca y Tolima.
- **CWD - Duración máxima del período húmedo:** En la Fig. 20 se presenta la tasa de cambio anual para este indicador de cambio climático y los cálculos mostraron que, para Colombia sus variaciones han oscilado entre $+0.22d\acute{ı}as/d\acute{e}cada \pm 0.52d\acute{ı}as/d\acute{e}cada$. Tendencias hacia a la disminución del período húmedo se obtuvieron en Córdoba, Cesar, Valle del Cauca, Arauca, Amazonas, Putumayo, Caquetá, Cauca y Huila.

Las Tablas 1, 2 y 3 presentan un resumen del comportamiento de la tasa de cambio por década que han presentado los indicadores de cambio climático expuestos, tanto por regiones naturales como por departamentos y regiones pluviométricamente homogéneas.

Tabla 1. Indicadores de cambio climático por regiones naturales

REGION	TNm °C/década	TMm °C/década	TXm °C/década	TN10p %/década	T90p %/década	DTR °C/década	WSDI días/década	PRCPTOT mm/década	R95p %/década	R99p %/década	CDD días/década	CWD día/década
Caribe	0,178	0,218	0,261	-1,508	3,635	0,095	0,573	23,937	10,632	0,163	1,686	0,041
Andina	0,209	0,239	0,270	-1,962	4,052	0,061	0,170	23,944	8,581	0,111	0,098	0,198
Pacífico	0,239	0,248	0,260	-2,285	4,131	0,019	0,026	76,863	25,499	0,180	-0,011	0,627
Orinoquía	0,215	0,256	0,294	-2,207	5,257	0,081	0,277	20,510	5,129	-0,025	-0,060	0,483
Amazonia	0,269	0,259	0,249	-2,657	4,846	-0,020	0,070	30,582	-12,525	-0,102	-1,233	0,268

En general, la Tabla 3 sugiere que las temperaturas (mínima, media y máxima) diarias han estado aumentado en todo el país a una razón superior a $0.2^{\circ}\text{C}/d\acute{e}cada$; así como, el rango de temperatura diario (DTR) y la duración de olas de calor (Mayormente en la región de Caribe-Cesar). El número de días lluviosos con precipitación mayor a 1mm (PRCPTOT) también ha aumentado en gran parte del país; excepto hacia la región del Mira-Patía donde ha descendido a una tasa de aproximadamente $-2\text{mm}/d\acute{e}cada$. Los eventos de aguaceros “fuertes” (R95p) y “muy fuertes” (R99p) también se han incrementado en gran parte del territorio nacional (Mayormente en el Pacífico Norte-Central y Risaralda-Saldaña) excepto hacia el norte de la Amazonía y Trapecio Amazónico. Si bien es cierto que, la señal tendencial de precipitación (PRCPTOT) ha estado aumentando con el tiempo, la duración del período seco (CDD) ha tendido a aumentar más rápidamente que la del período húmedo (CWD) en las regiones de Caribe-Cesar, Sinú-San Jorge-Porce, Orinoquía Occidental y en la región de Sur Magdalena-Cesar; sugiriendo que en dichas regiones la lluvia se estaría distribuyendo en menos días; situación que explicaría la tendencia al aumento de los eventos extremos asociados a lluvias “fuertes” y “muy fuertes” (R95p y R99p respectivamente).

Tabla 2. Indicadores de cambio climático por departamentos

DEPARTAMENTO	TNm °C/década	TMm °C/década	TXm °C/década	TN10p %/década	T90p %/década	DTR °C/década	WSDI días/década	PRCPTOT mm/década	R95p %/década	R99p %/década	CDD días/década	CWD día/década
Amazonas	0,266	0,267	0,271	-2,610	5,328	0,012	0,112	30,790	-5,660	0,064	-0,956	0,232
Antioquia	0,231	0,242	0,257	-2,307	4,228	0,020	0,040	111,304	35,817	0,208	0,218	0,831
Arauca	0,186	0,234	0,285	-1,369	4,310	0,110	0,088	18,510	0,323	-0,021	1,601	0,549
Atlántico	0,162	0,205	0,256	-1,314	3,756	0,103	0,179	26,464	0,640	0,303	1,943	0,101
Bolívar	0,244	0,239	0,240	-2,699	3,479	-0,012	0,136	5,259	2,155	-0,073	0,156	-1,291
Boyacá	0,202	0,258	0,314	-2,041	4,566	0,112	0,339	24,588	18,092	0,045	-0,396	0,162
Caldas	0,167	0,213	0,273	-0,886	3,465	0,136	0,037	13,847	-4,189	0,143	-0,152	0,075
Caquetá	0,254	0,243	0,223	-2,607	4,400	-0,033	0,016	18,626	-24,145	-0,160	-0,556	-0,121
Casanare	0,264	0,261	0,264	-2,704	4,179	-0,003	0,062	26,402	2,746	-0,008	1,013	-0,345
Cauca	0,153	0,223	0,297	-1,216	4,284	0,137	0,057	21,613	6,482	0,169	0,341	0,249
Cesar	0,188	0,222	0,259	-1,722	4,057	0,070	0,000	21,173	7,238	0,034	0,502	-0,005
Chocó	0,197	0,249	0,303	-1,744	4,667	0,104	0,448	18,646	6,336	0,101	-0,090	0,160
Córdoba	0,221	0,250	0,268	-2,480	3,700	0,042	0,087	114,485	45,237	0,418	1,299	0,502
Cundinamarca	0,182	0,226	0,274	-1,470	3,729	0,084	0,251	10,444	12,598	0,332	0,049	2,244
Guainía	0,234	0,261	0,288	-1,832	3,538	0,057	0,031	1,996	1,962	0,050	-2,755	0,158
Guaviare	0,227	0,246	0,270	-2,203	3,701	0,036	0,010	26,979	11,163	-0,017	-0,515	-0,225
Huila	0,227	0,254	0,288	-2,347	5,156	0,059	0,216	1,447	0,541	0,127	0,129	0,032
La Guajira	0,269	0,235	0,197	-2,704	3,035	-0,085	0,000	8,242	-11,538	-0,310	2,759	-0,068
Magdalena	0,219	0,240	0,262	-2,137	4,539	0,042	0,153	43,395	14,965	0,115	2,445	0,251
Meta	0,254	0,251	0,245	-2,681	3,697	0,005	0,008	-2,565	2,347	0,062	0,619	-0,398
Nariño	0,185	0,225	0,257	-1,665	3,948	0,086	1,139	21,928	10,318	0,000	0,156	0,046
Norte de Santander	0,176	0,201	0,229	-1,498	3,392	0,066	1,222	20,446	20,515	0,202	0,578	-0,005
Putumayo	0,253	0,268	0,275	-2,663	5,953	0,022	0,134	59,253	-3,597	-0,160	-0,629	1,441
Quindío	0,217	0,260	0,299	-1,702	4,615	0,095	0,142	-4,293	21,396	-0,206	-0,368	-0,107
Risaralda	0,235	0,247	0,268	-2,150	4,161	0,043	0,000	5,275	4,849	0,196	-0,256	-0,022
San Andrés y Providencia	0,195	0,221	2,330	3,280	2,680	-0,114	0,052	7,490	0,254	21,915	1,060	0,000
Santander	0,160	0,218	0,277	-1,474	3,330	0,129	0,572	35,785	22,480	0,361	0,154	0,047
Sucre	0,198	0,255	0,322	-2,143	3,382	0,129	0,050	9,844	-3,998	0,072	2,248	0,115
Tolima	0,315	0,302	0,297	-2,562	4,064	-0,029	0,112	51,423	16,529	0,224	0,047	0,442
Valle del Cauca	0,222	0,251	0,278	-2,736	3,820	0,053	0,088	68,109	15,830	0,204	-0,007	0,213
Vaupés	0,215	0,254	0,285	-2,256	5,544	0,074	0,361	36,263	-0,105	-0,162	-2,364	0,957
Vichada	0,334	0,274	0,211	-2,855	5,621	-0,121	0,039	28,612	-43,147	-0,281	-1,139	1,024

Tabla 3. Indicadores de cambio climático por regiones pluviométricamente homogéneas

Región pluviométricamente homogénea	TNm °C/década	TMm °C/década	TXm °C/década	TN10p %/década	T90p %/década	DTR °C/década	WSDI días/década	PRCPTOT mm/década	R95p %/década	R99p %/década	CDD días/década	CWD día/década
Sinú - San Jorge - Porce	0,189	0,218	0,253	-1,671	4,124	0,067	0,064	24,434	4,381	0,092	0,824	0,046
Sogamoso - Lebrija - Altiplano	0,179	0,232	0,286	-1,437	4,215	0,108	0,188	17,177	12,892	0,252	0,150	0,196
Medellín - Carare - Opón	0,210	0,246	0,282	-1,998	4,599	0,070	0,305	47,569	12,066	0,108	-0,050	0,301
Pacífico Norte y Central	0,231	0,243	0,257	-2,348	4,142	0,024	0,032	93,240	31,893	0,235	-0,052	0,731
Patía y Mira	0,269	0,278	0,287	-2,100	3,461	0,027	0,029	-2,025	3,073	0,117	0,126	0,152
Sur Magdalena Cauca	0,223	0,239	0,259	-2,245	3,701	0,042	0,103	2,319	2,101	0,058	0,206	-0,040
Orinoquía Occidental	0,214	0,254	0,298	-2,081	4,900	0,085	0,219	9,897	6,826	0,014	0,718	0,216
Norte Amazonia	0,273	0,264	0,256	-2,637	4,880	-0,018	0,075	29,968	-8,444	-0,073	-1,117	0,206
Trapezio Amazonico	0,256	0,244	0,225	-2,625	4,409	-0,032	0,017	20,505	-21,169	-0,136	-1,019	-0,119
Catatumbo	0,177	0,219	0,266	-1,467	3,560	0,083	0,293	12,235	13,468	0,420	0,660	2,171
Orinoquía Oriental	0,224	0,260	0,289	-2,372	5,642	0,067	0,310	43,832	0,044	-0,171	-1,694	1,120
Risaralda - Saldaña	0,232	0,252	0,273	-2,342	3,755	0,041	0,271	57,155	19,634	0,228	-0,121	0,249
Caribe - Cesar	0,177	0,219	0,261	-1,562	3,550	0,098	0,892	25,359	14,796	0,196	1,799	0,047

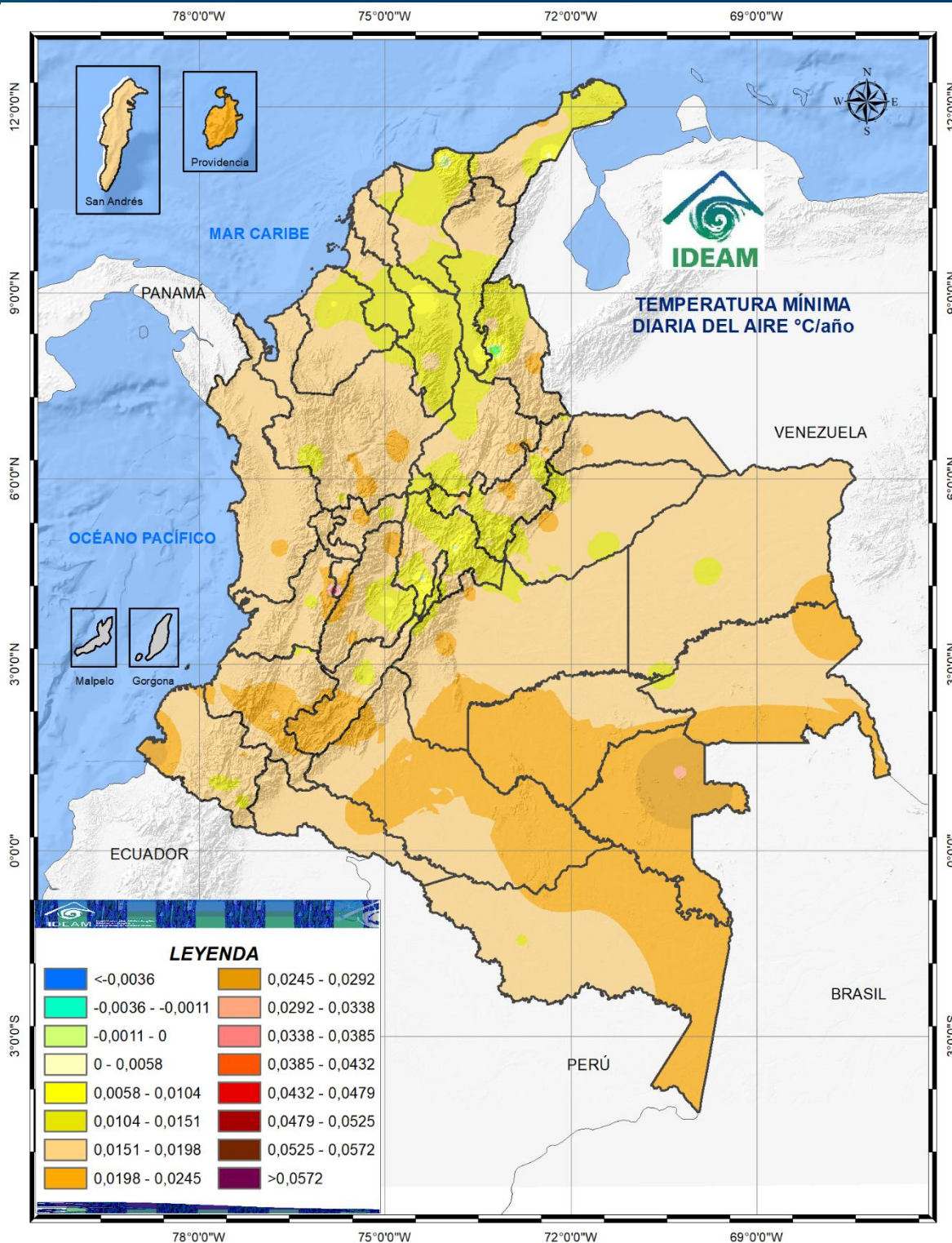


Figura 9. Tendencia anual de la temperatura mínima diaria del aire.

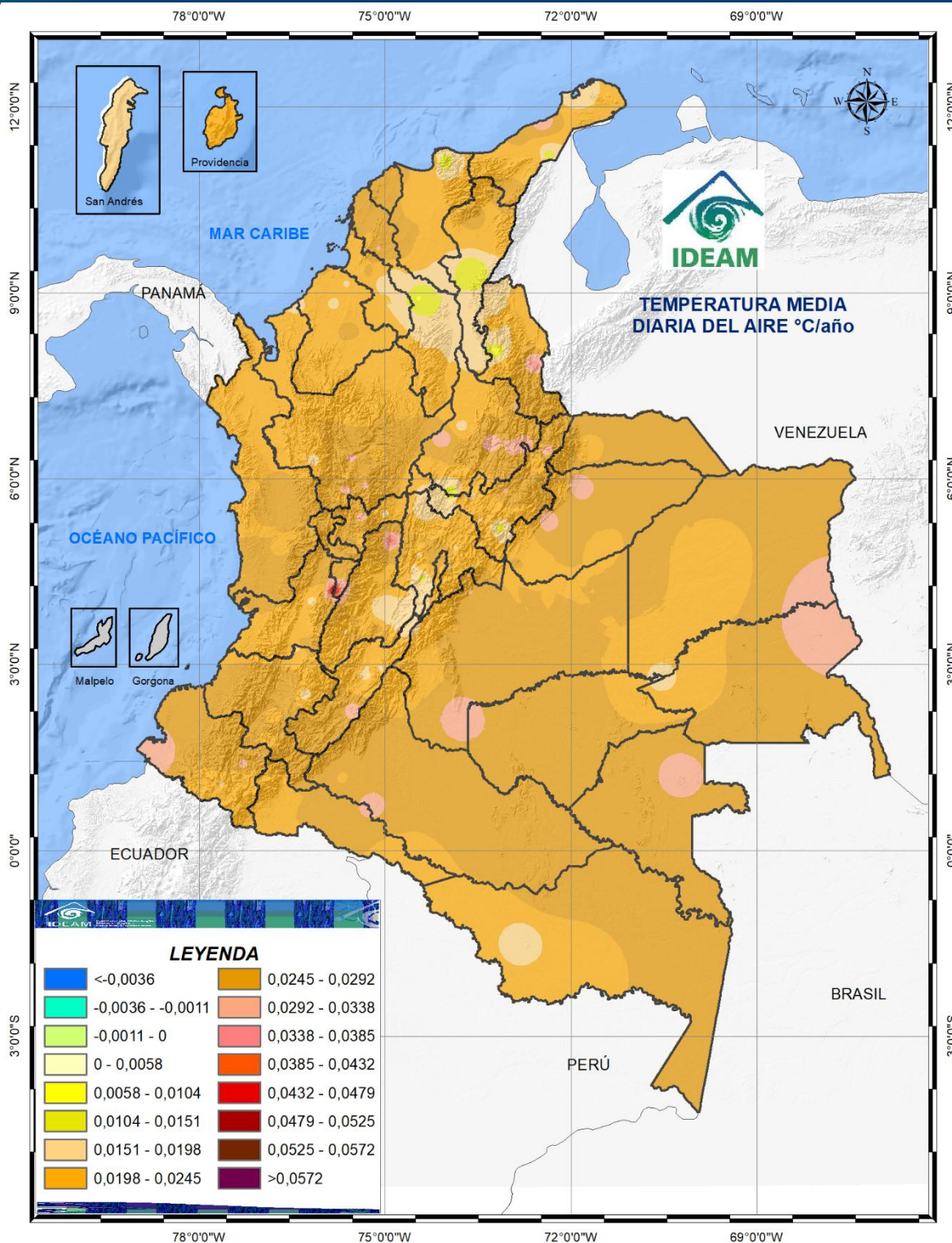


Figura 10. Tendencia anual de la temperatura media diaria del aire.

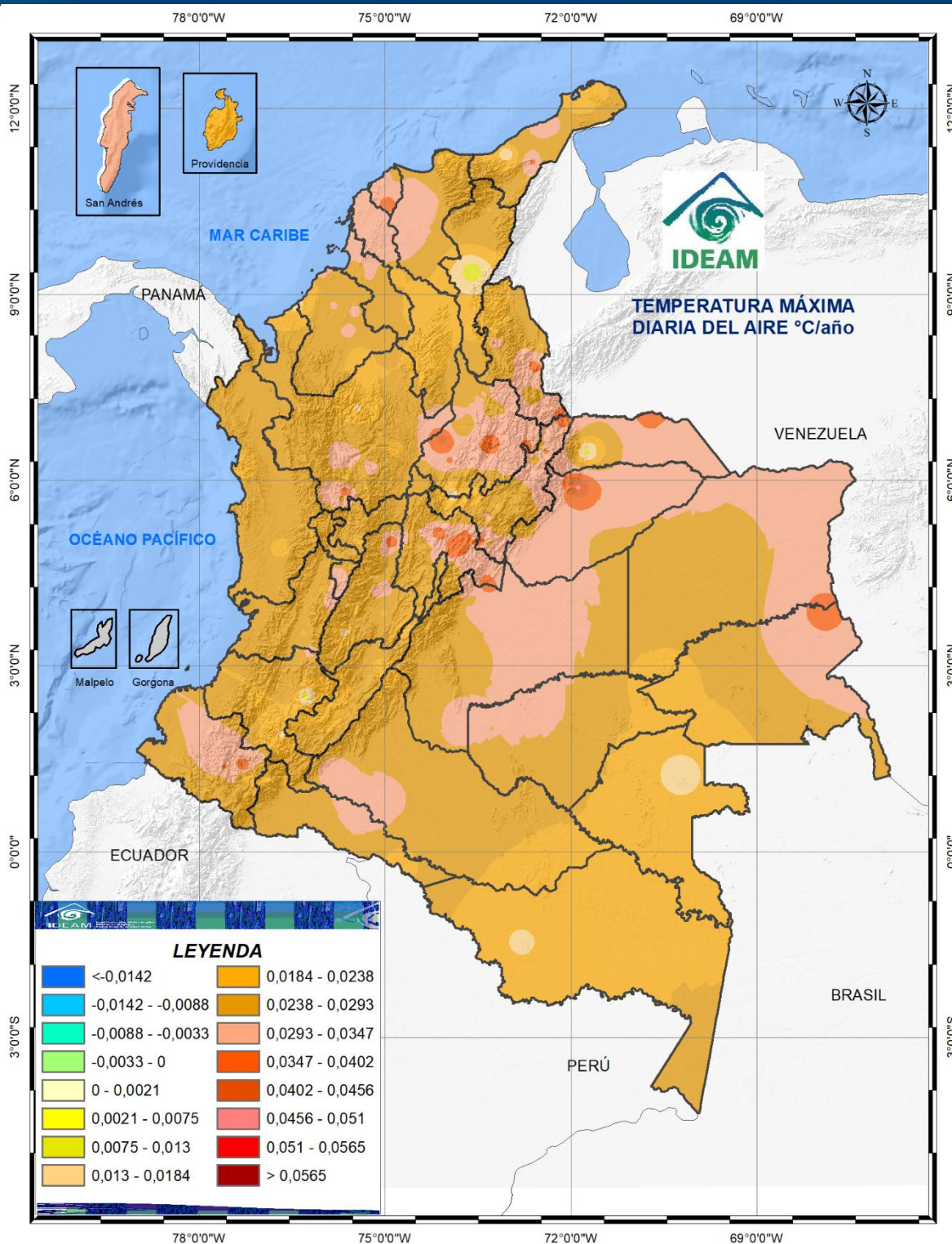


Figura 11. Tendencia anual de la temperatura máxima diaria del aire.

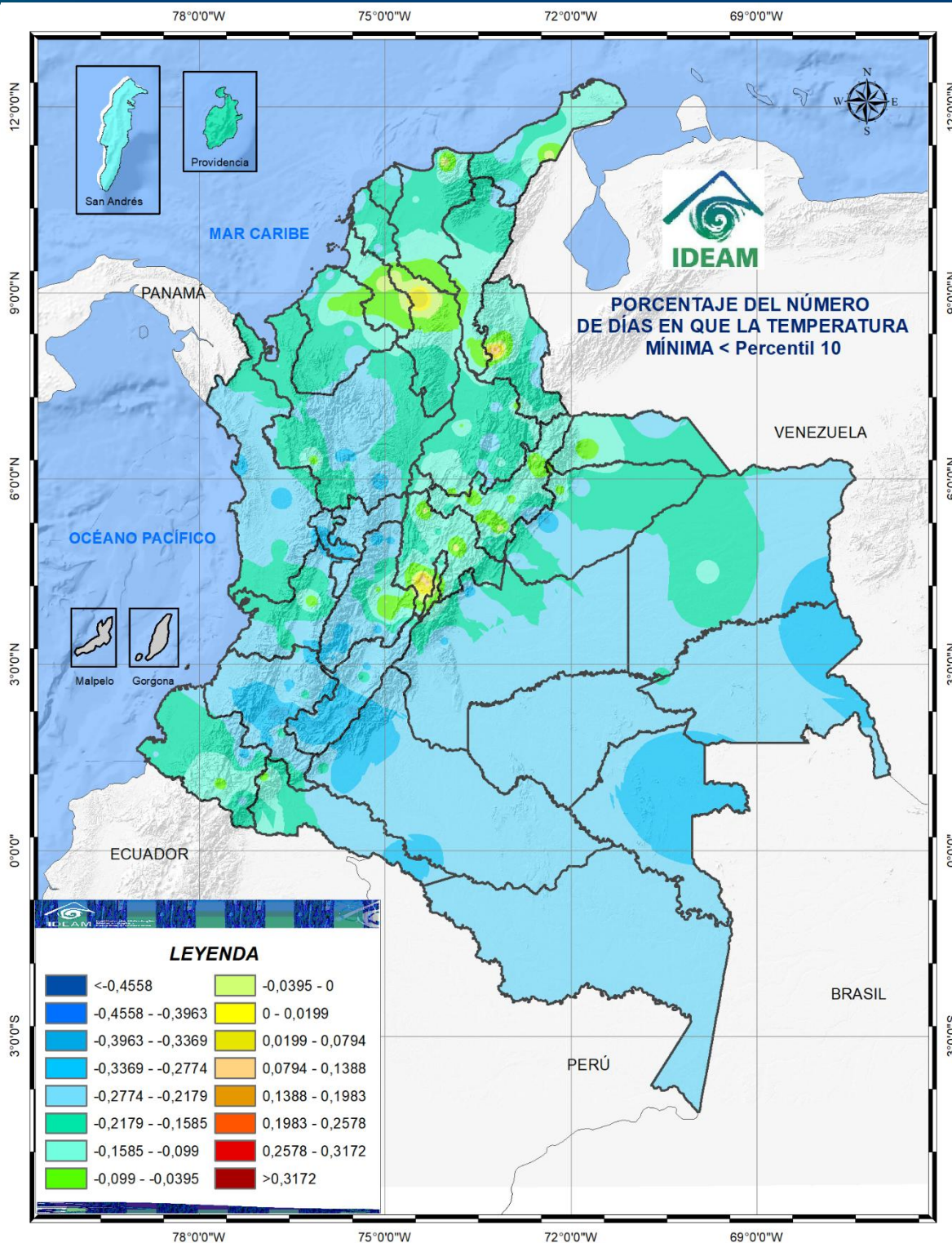


Figura 12. Tendencia anual del porcentaje de días en que temperatura mínima (TN) es menor al percentil 10.

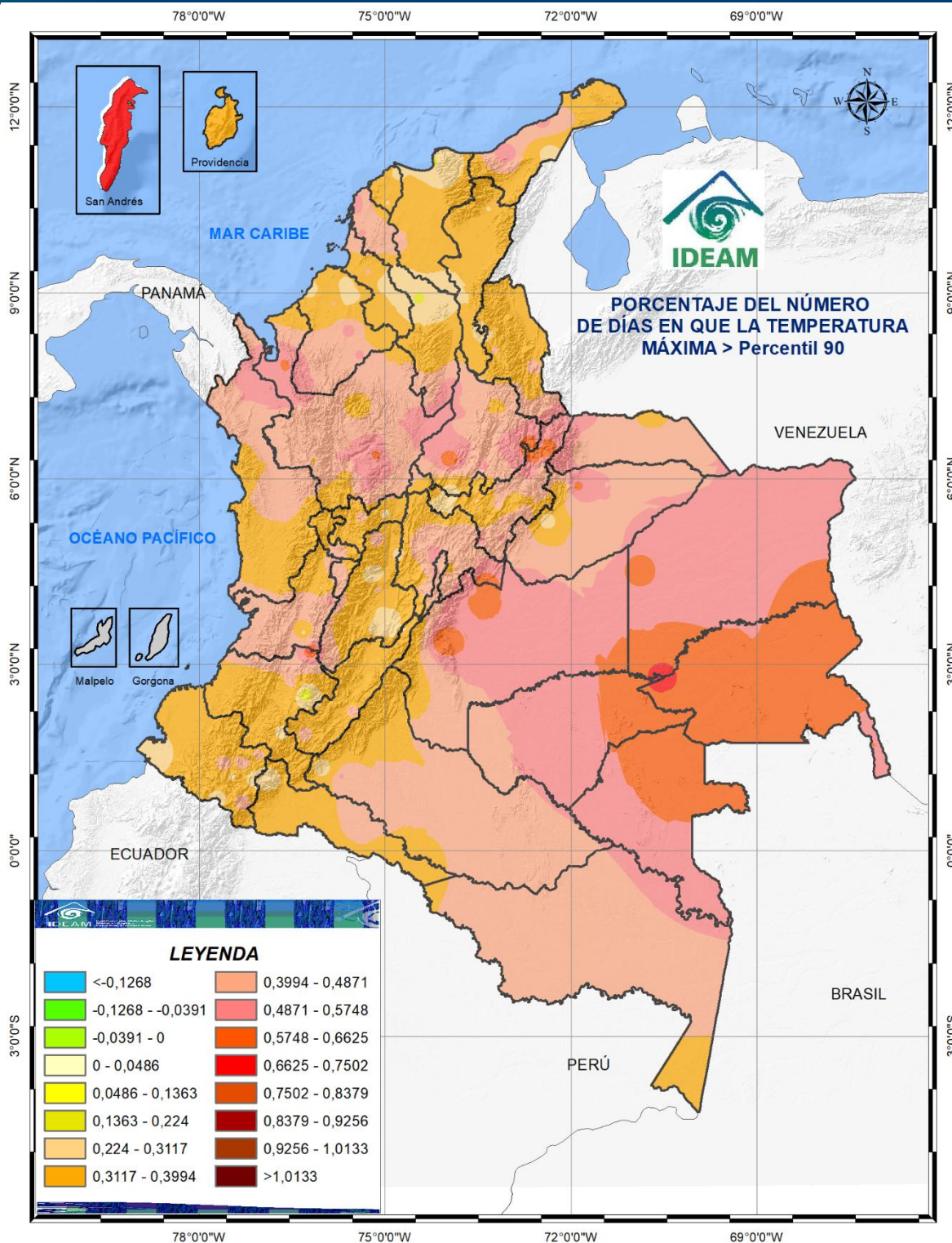


Figura 13. Tendencia anual del porcentaje de días en que temperatura máxima (TX) es mayor al percentil 10.

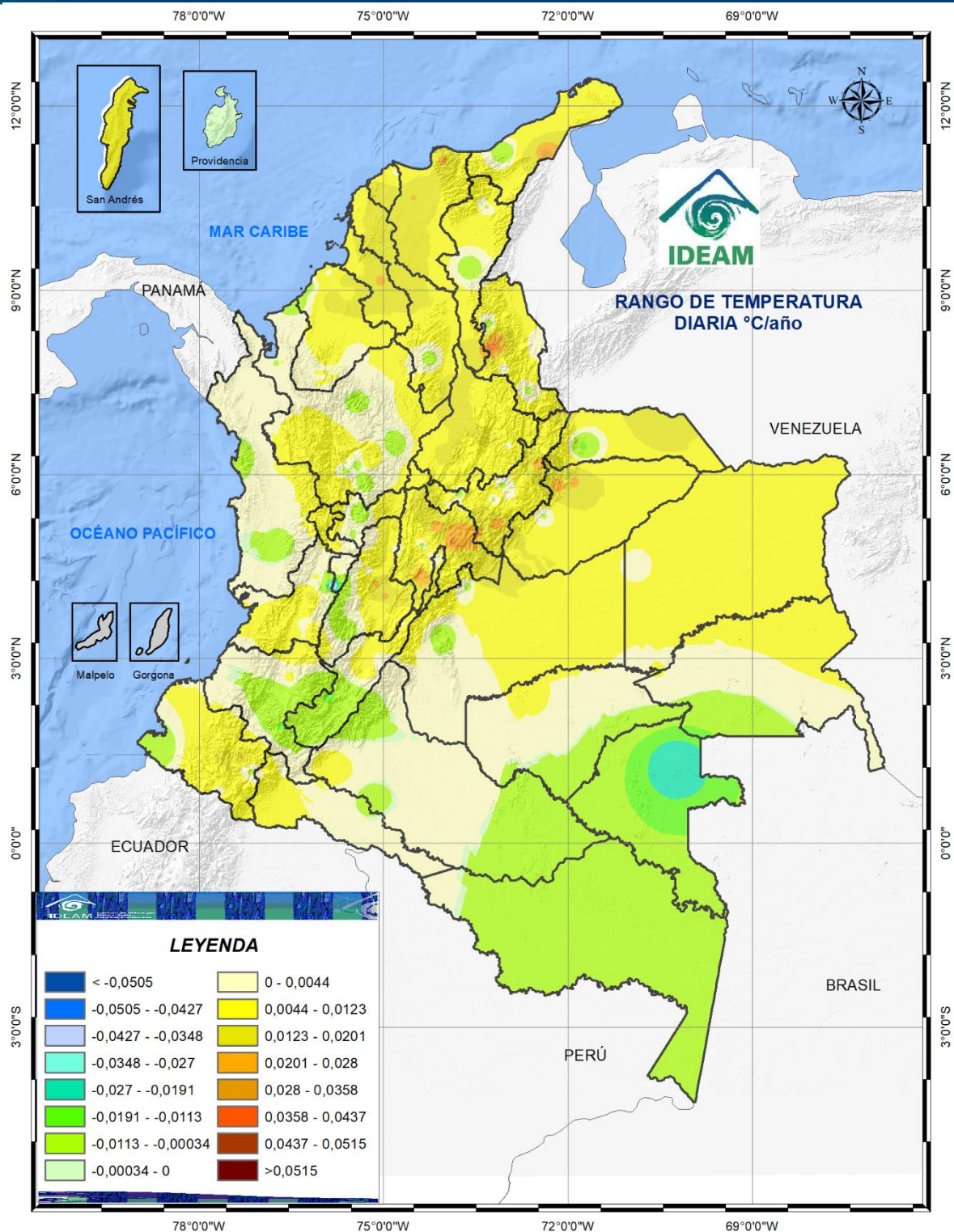


Figura 14. Tendencia anual del rango de temperatura diaria.

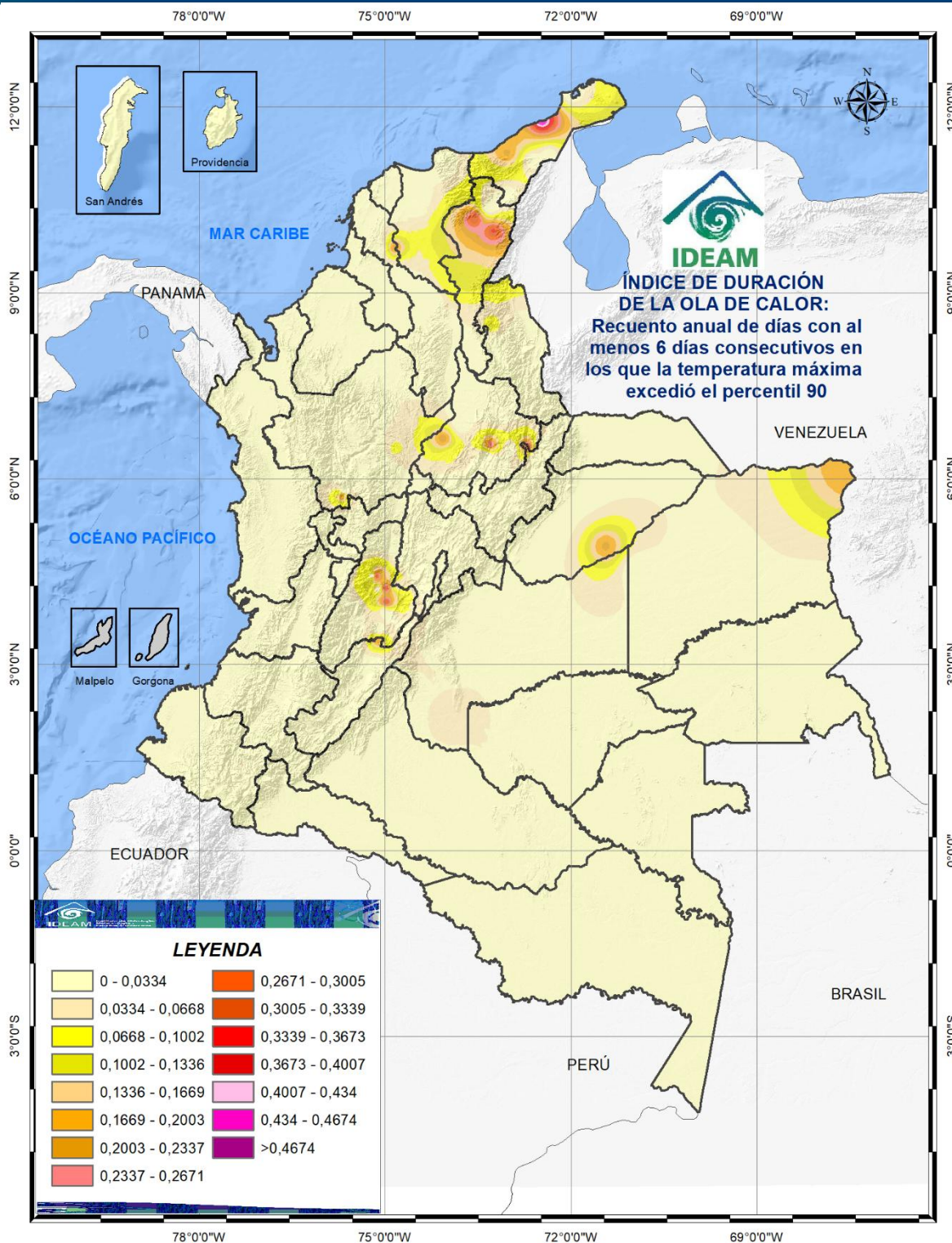


Figura 15. Tendencia anual del índice de duración de la ola de calor.

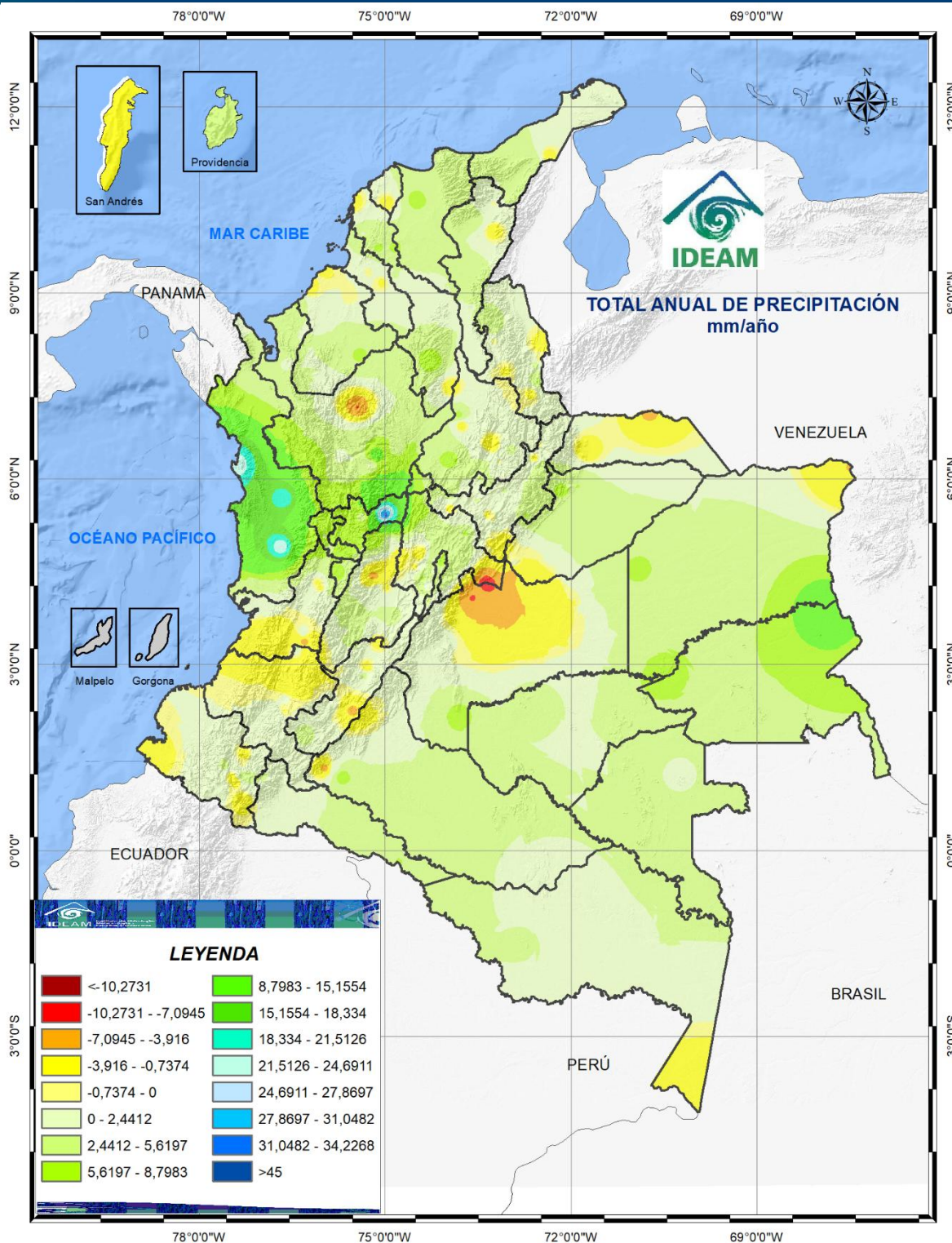


Figura 16. Tendencia anual la precipitación total anual sobre días húmedos.

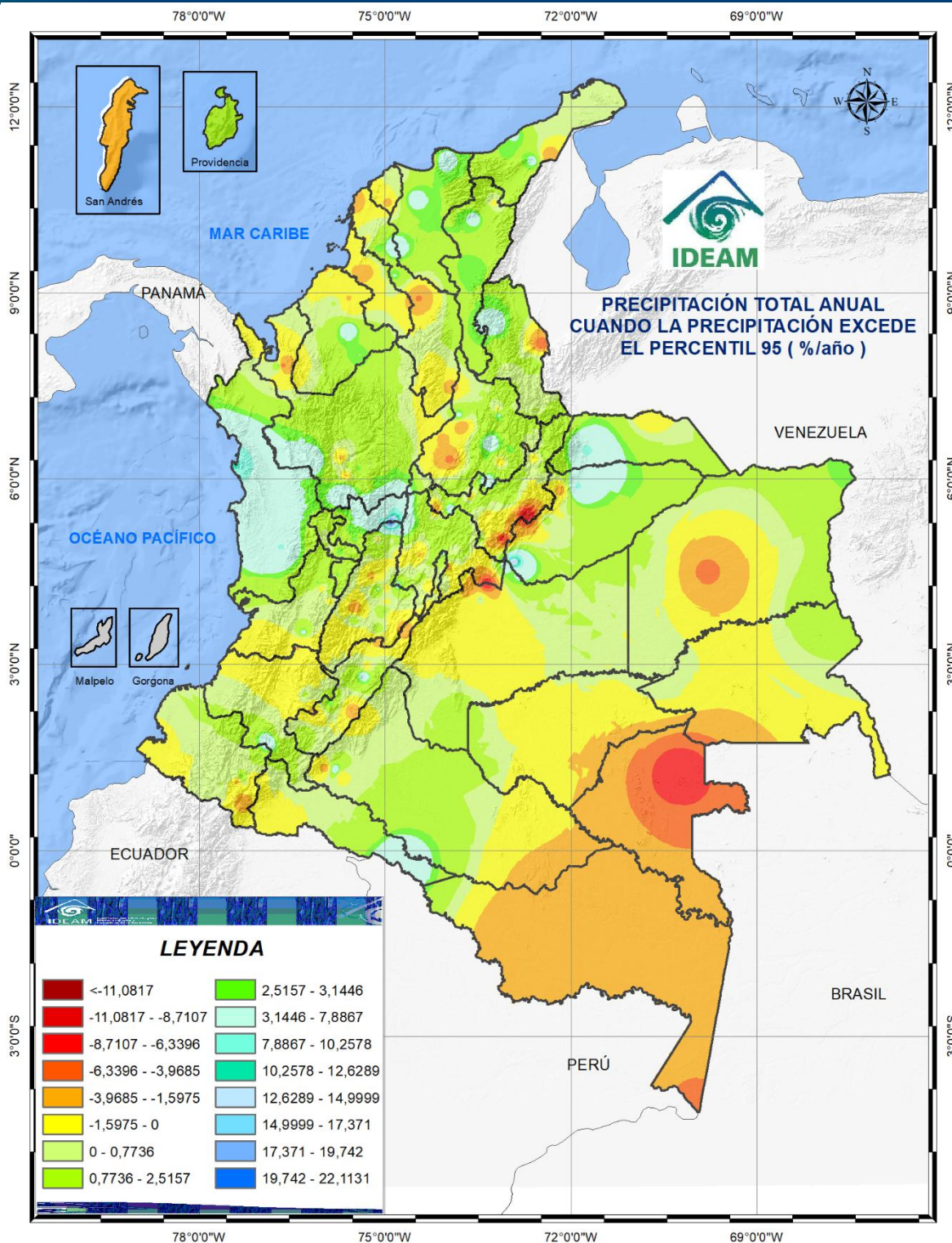


Figura 17. Tendencia anual de la precipitación cuando excede el percentil 95.

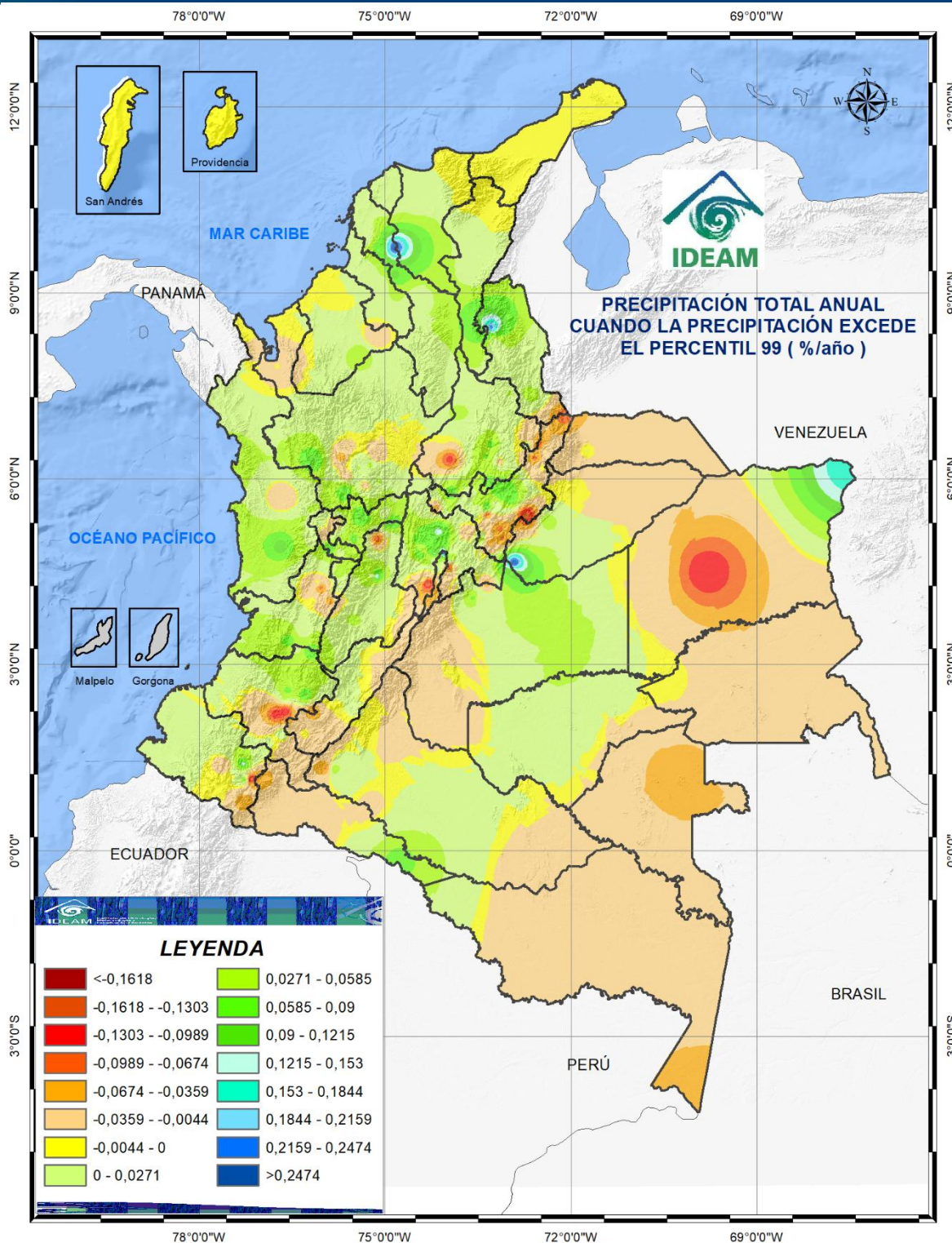


Figura 18. Tendencia anual de la precipitación cuando excede el percentil 99.

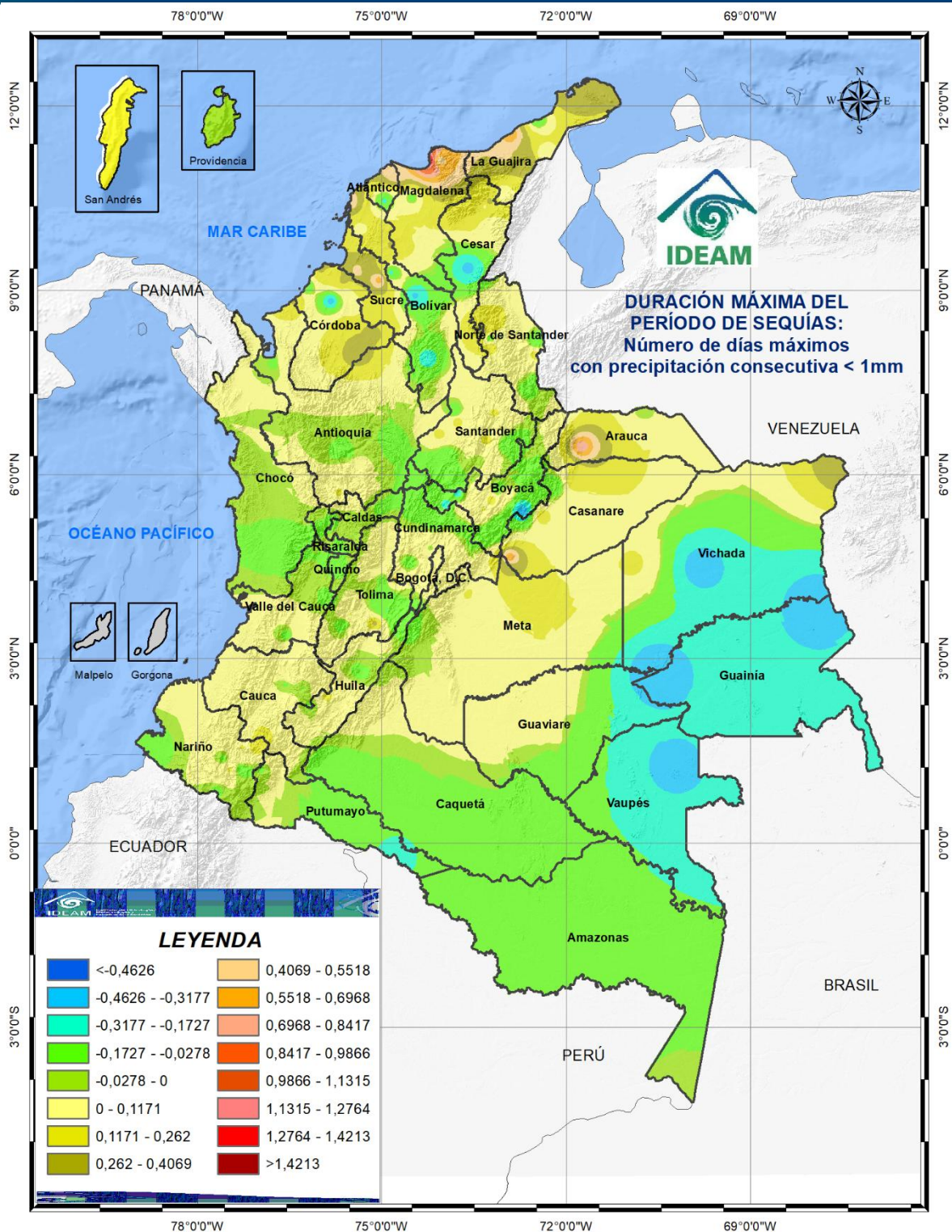


Figura 19. Tendencia anual de la duración máxima del período seco.

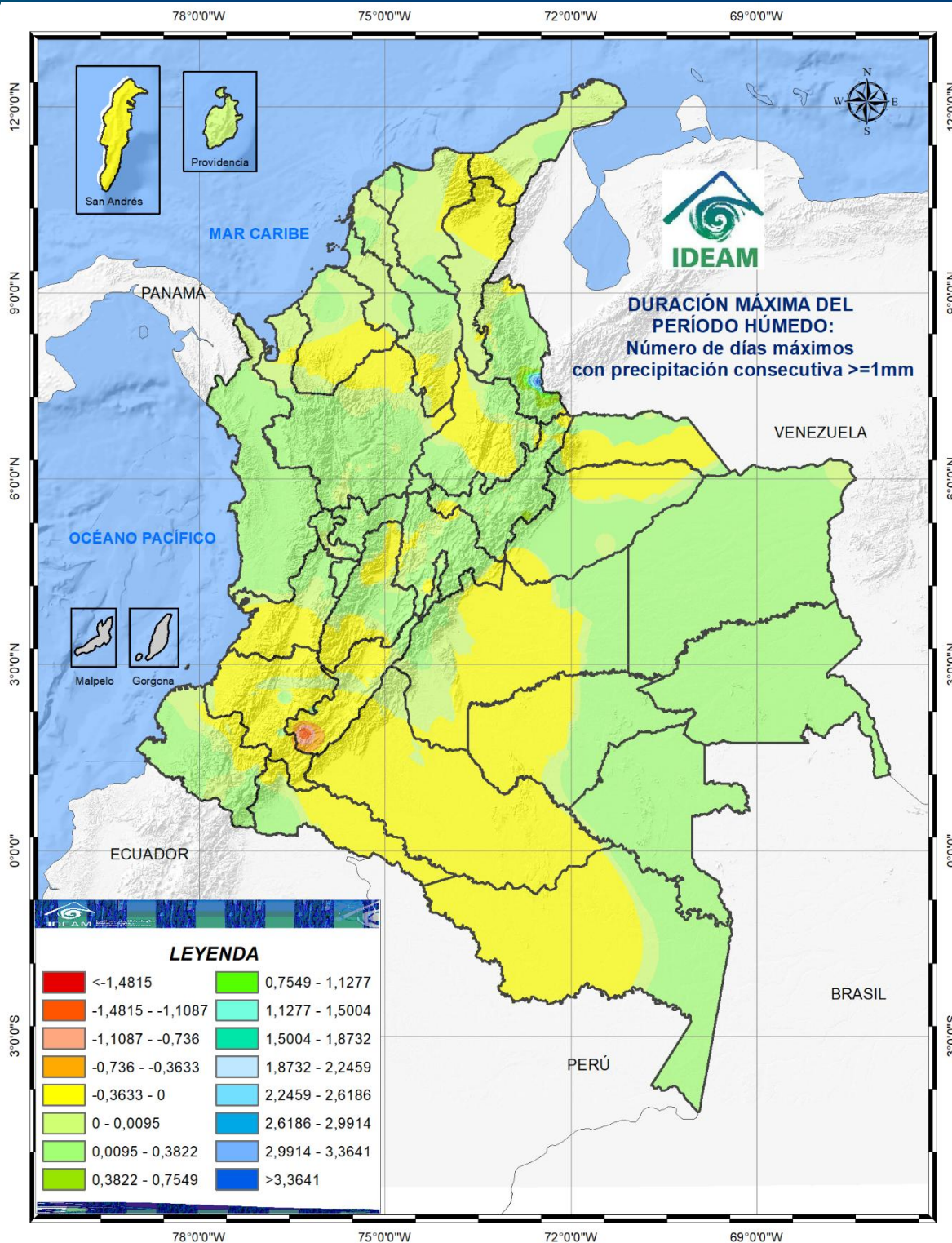


Figura 20. Tendencia anual de la duración máxima del período húmedo.

CONCLUSIONES

- Para el período comprendido entre 1981-2020, la temperatura mínima diaria del aire (TNx) estuvo aumentando en la mayor parte del país; en la región Caribe su tasa de aumento fue $+0.178^{\circ}\text{C}/\text{década}$, en la región Andina de $+0.209^{\circ}\text{C}/\text{década}$, en la región Pacífica de $+0.239^{\circ}\text{C}/\text{década}$; mientras que, en la Orinoquía y Amazonía fueron de $+0.215$ y $+0.269^{\circ}\text{C}/\text{década}$ respectivamente.
- Una situación similar se obtuvo con la temperatura media diaria (TMm), la cual aumento $+0.218$, $+0.239$, $+0.248$, $+0.256$ y $+0.259^{\circ}\text{C}/\text{década}$ en las regiones Caribe, Andina, Pacífica, Orinoquía y Amazonía respectivamente.
- Igualmente, la temperatura máxima diaria se incrementó a razón de $+0.261$, $+0.270$, $+0.260$, $+0.294$ y $+0.249^{\circ}\text{C}/\text{década}$ en las regiones Caribe, Andina, Pacífica, Orinoquía y Amazonía respectivamente.
- El porcentaje de ocurrencia de eventos de temperatura mínima por debajo del percentil 10 (TN10p), en general ha disminuido en la mayor parte del país a tasas de -1.508 , -1.962 , -2.285 , -2.207 , $-2.657\%/ \text{década}$ en las regiones Caribe, Andina, Pacífica, Orinoquía y Amazonía respectivamente; indicando con ello que las noches se han tornado, con el transcurrir del tiempo, más cálidas. No obstante, las salidas realizadas con climpack estiman que para el trimestre septiembre-octubre-noviembre la tendencia en este indicador de cambio climático es positiva con valores de $+0.201$, $+0.257$, $+0.243$, $+0.295$ y $+0.315\%/ \text{década}$ para las regiones Caribe, Andina, Pacífica, Orinoquía y Amazonía respectivamente.
- El porcentaje de ocurrencia de eventos de temperatura máxima por encima del percentil 90 (TX90p), en general ha aumentado en la mayor parte del país a tasas de $+3.635$, $+4.052$, $+4.131$, $+5.257$ y $+4.846\%/ \text{década}$ en las regiones Caribe, Andina, Pacífica, Orinoquía y Amazonía respectivamente; indicando con ello que los días se han tornado paulatinamente más cálidos.
- El rango de temperatura diario (DTR) se ha incrementado en las regiones Caribe, Andina, Pacífica y Orinoquía a razones de $+0.095$, $+0.061$, $+0.019$ y $+0.081^{\circ}\text{C}/\text{década}$; mientras que, en la Amazonía ha disminuido a razón de $-0.020^{\circ}\text{C}/\text{década}$. Esta tendencia negativa de la Amazonía se presenta particularmente en los trimestres diciembre-enero-febrero, marzo-abril-mayo y junio-julio-agosto a razones de -0.117 , -0.064 y $-0.014^{\circ}\text{C}/\text{década}$ respectivamente.
- La duración de ola de calor (WSDI) ha aumentado a tasas de $+0.573$, $+0.170$, $+0.026$, $+0.277$ y $+0.070\text{días}/\text{década}$ para las regiones Caribe, Andina, Pacífica, Orinoquía y Amazonía respectivamente.
- La precipitación total anual (PRCPTOT) se ha incrementado en la mayor del país; excepto en Quindío y Meta, donde se estimaron tasas de cambio de -4.293 y $-2.565\text{mm}/\text{década}$. Para las regiones Caribe, Andina, Pacífica, Orinoquía y Amazonía se estimaron cambios de $+23.937$, $+23.944$, $+76,863$, $+20.510$ y $+30,582\text{mm}/\text{década}$; siendo la región Pacífica la zona del país donde se han presentado las tasas de cambio más severas; mientras que, en la Orinoquía se han presentado la tendencia más suave. Estacionalmente, la Amazonía presentó una tasa de cambio negativa para el trimestre junio-julio-agosto con un valor de $-10.550\text{mm}/\text{década}$. Sin embargo, se recomienda tener en cuenta que estos datos son una

referencia de la tendencia que se calculó para el período 1981-2020; ya que no son estadísticamente significativos en la mayor parte del país, como ocurre con todos los indicadores que depende de los datos diarios de precipitación.

- El porcentaje de ocurrencia de precipitaciones diarias que superan el percentil 95 (R95p) asociado con precipitaciones “fuertes” ha aumentado a razones +10.632, +8.581, +25,499 y +5.129%/década en las regiones Caribe, Andina, Pacífica y Orinoquía respectivamente; indicando en principio que, en la región Andina se han incrementado estos eventos más rápidamente que en cualquier otra región del país. Por otro lado, en la Amazonía, los eventos fuertes de precipitación han disminuido a una tasa de -12.525%/década.
- Similar a lo anterior, los eventos de lluvia “muy fuerte” asociados al porcentaje de ocurrencia de precipitaciones diarias que superan el percentil 99 (R99p) ha aumentado a razones de +0.163, +0.111 y +0.180%/década en las regiones Caribe, Andina y Pacífica respectivamente. Por el contrario, en el oriente del país, la tendencia ha sido negativa a razones de -0.025 y -0.102%/década sobre la Orinoquía y Amazonía respectivamente.
- La duración máxima de los períodos de sequía (CDD) ha aumentado en las regiones Caribe y Andina a tasas de +1.686 y +0.098días/década; mientras que, en las regiones Pacífica, Orinoquía y Amazonia ha disminuido a razón de -0.011, -0.060 y - 1.233días/década respectivamente.
- Para finalizar, la duración máxima de los períodos húmedos se ha incrementado en la mayor parte del país a razón de +0.041, +0.198, +0.627, +0.483 y +0.268días/década en las regiones Caribe, Andina, Pacífica, Orinoquía y Amazonía respectivamente.
- Si bien es cierto que la precipitación total anual (PRCPTOT) está aumentando, hay departamentos de Colombia donde el período de la sequía también lo hace (CDD>CWD); indicando con ello que, los volúmenes de precipitación pudiesen estar distribuyéndose en menos días; apoyando el resultado del porque los eventos extremos de lluvia fuerte (R95p) igualmente se han incrementado; esto estaría ocurriendo especialmente en San Andrés y Providencia, La Guajira, Magdalena, Atlántico, Bolívar, Cesar, Córdoba y Sucre en la región Caribe; Norte de Santander, Santander y Huila en la región Andina; Cauca y Nariño en la región Pacífica; y en Arauca, Casanare y Meta sobre la Orinoquía.

AGRADECIMIENTOS

Los autores extienden un especial agradecimiento al Dr. José A. Guijarro y al Dr. Enric Aguilar, asesores de la OMM y autores de las librerías de R: climatol y inqc respectivamente, quienes a parte de compartir este estándar de obtención de indicadores de cambio climático en la Capacitación de Servicios Climáticos (2 edición) a países miembros de la ARIII y ARIV, atendieron de forma continua y oportuna nuestras dudas vía correo electrónico; por lo anterior, reconocemos que su atención fue clave para la obtención de los resultados finales.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguilar, Enric. & Skrynyk, Oleg. (2021). *Package INQC. Title: Quality Control of Climatological Daily Time Series*. <https://github.com/INDECIS-Project/INQC>
- Alexandersson, H. (1986). *A homogeneity test applied to precipitation data*. *Journal of Climatology*, 6(6), 661–675. <https://doi.org/10.1002/joc.3370060607>
- Barrios, J. S. (2014). *Informe final. Contrato 13-13-014-314PS de 2014 convenio con IAVH*. Instituto De Investigación De Recursos Biológicos Alexander Von Humboldt - Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM.
- Bernal, N. R., Correa, R. L., & Rangel, E. (2010). *Homogenización de series de tiempo mensuales de precipitación*. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM.
- Benavidez H., Mayorga R. & Hurtado G. (2007). *Análisis de índices de extremos climáticos para Colombia usando el RClimDex*. NOTA TÉCNICA IDEAM–METEO/007-2007. <http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/020661/NotaRclimdexfinal.pdf>
- ESRI. (2023). *ArcGis Pro*. Obtenido de ArcGis Pro: <https://pro.arcgis.com/es/pro-app/latest/tool-reference/spatial-analyst/idw.htm>
- Giraldo, R., & Martínez, S. D. 2016. *Informe final. Contrato Interadministrativo 231-2015* Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) y Universidad Nacional de Colombia.
- Guijarro, J. A. (2018). *Homogeneización de series climáticas con Climatol*. Agencia Estatal de Meteorología (AEMET), D.T. En Islas Baleares, España, 1, 22. Retrieved from http://www.climatol.eu/homog_climatol-en.pdf
- _____ (2023). *Package CLIMATOL. Title: Climate Tools (Series Homogenization and Derived Products)*. <https://cran.r-project.org/package=climatol>
- _____ (2023). *Guía del uso del paquete R climatol (version 4)*. <https://www.climatol.eu/climatol4-es.pdf>
- Guzmán, D., Ruíz, J. F., & Cadena, M. (2014). *Regionalización de Colombia según la estacionalidad de la precipitación media mensual, a través de análisis de componentes principales (ACP)*. Nota Técnica IDEAM, METEO, 54. <http://www.ideam.gov.co/documents/21021/21141/Regionalizacion+de+la+Precipitacion+Media+Mensual/1239c8b3-299d-4099-bf52-55a414557119>
- IDEAM. (2015). *Atlas Climatológico de Colombia – Interactivo*. Bogotá, D. C. ISBN: Volumen 1: 978-958-8067-73-5
- IDEAM – UNAL. (2018). *Variabilidad Climática y Cambio Climático en Colombia*, Bogotá, D.C., 2018. ISBN: 978-958-8067-97-1
- IPCC. (2023): *Summary for Policymakers*. In: *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on*

Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, pp. 1-34, doi: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.001

Kahya, Ercan. & Bickici, Bugrayhan. & Akdeniz, Esra. (2016). *Homogeneity Analysis of Precipitation Series in Turkey*.

https://www.researchgate.net/publication/309196205_Homogeneity_Analysis_of_Precipitation_Series_in_Turkey/citation/download

Karl, T.R., N. Nicholls, & A. Ghazi. (1999). *CLIVAR/GCOS/WMO workshop on indices and indicators for climate extremes: Workshop summary*, Weather and Climate Extremes, 42, 3–7. doi: 10.1007/978-94-015-9265-9_2

Martínez, A. (2017). *Informe “Estimación de datos faltantes y homogenización de las series de tiempo mensuales de precipitación en el periodo 1980 - 2016”* contrato 232 de 2017. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM.

Mayorga R., Hurtado G. & Benavides H. (2011): *Evidencias de cambio climático en Colombia con base en información estadística*. Nota Técnica del IDEAM, IDEAM–METEO/001-2011, Bogotá D.C., 48p.

McKee, T.B., Doesken, N.J. & Kleist, J. (1993). *The relationship of drought frequency and duration to time scales*. Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology, 17, 1709–83.

Nairn, J.R. & Fawcett, R.G. (2013). *Defining heatwaves: heatwave defined as a heat-impact event servicing all community and business sectors in Australia*. Centre for Australian Weather and Climate Research Technical Report #60. Download (PDF from cawcr.gov.au): https://www.cawcr.gov.au/technical-reports/CTR_060.pdf

Ocampo-López, O. L, Vélez-Upegui, J.J., Forero-Hernández, T. & Marín-Salazar J.P. (2020). *Análisis de tendencias climáticas con RClimdex en el departamento de Caldas*. Scientia et Technica Año XXV, Vol. 25, No. 04, diciembre de 2020. Universidad Tecnológica de Pereira. ISSN 0122-1701 y ISSN-e: 2344-7214, Colombia DOI: <https://doi.org/10.22517/23447214.22771> Artículo de investigación científica y tecnológica.

<https://revistas.utp.edu.co/index.php/revistaciencia/article/view/22771>

OMM. (2017). *Directrices de la Organización Meteorológica Mundial sobre la generación de un conjunto definido de productos nacionales de vigilancia del clima*. Organización Meteorológica Mundial, OMM-N° 1204.

Paulhus, J. L. H., & Kohler, M. A. (1952). *Interpolation of Missing Precipitation Records*. Monthly Weather Review, 80(8), 129–133. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1952\)080<0129:iompr>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1952)080<0129:iompr>2.0.co;2)

Peña, D. (2002). *Análisis de datos multivariantes*. Universidad Carlos III. Alianza editorial. Autor.

Peterson, T.C., et al. (2001). *Report on the Activities of the Working Group on Climate Change Detection and Related Rapporteurs 1998–2001*, WMO, Rep. WCDMP-47, WMO-TD 1071, Geneva, Switzerland, 143pp. Download (PDF from clivar.org): Peterson et al. 2001 (PDF)

Perkins, S.E. & Alexander, L.V. (2013). *On the Measurement of heatwaves*, J. Climate, 26, 4500–17. doi: 10.1175/JCLI-D-12-00383.1

Pinilla, M. C. & Pinzón, C. (2012). *Caracterización de eventos extremos asociados a la precipitación usando RClimDex, en la parte central del departamento de Santander, Colombia*. Grupo técnico. Convenio Fundación Natura Colombia - ISAGEN E.S.P.

http://aeclim.org/wp-content/uploads/2016/02/0057_PU-SA-VIII-2012-MC_PINILLA.pdf

Ruiz J.F. & Melo, J.Y. (2023). *Tendencias de cambio climático para la temperatura del aire y la precipitación en Colombia durante el período 1981-2020 como aporte a cuarta comunicación nacional sobre cambio climático usando climatol*. IDEAM METEO/003-2023. Pp 31.

Sorza, S. M. (2016). *Informe final*. Contrato N° PS0580 de 2015 convenio CORPOICA. CORPOICA.

Vicente-Serrano, S.M., Beguería, S. & López-Moreno, J.I., 2010. *A Multiscalar Drought Index Sensitive to Global Warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index*, J. Climate, 23, 1696–718. doi: 10.1175/2009JCLI2909.1

Wilks, D. S. (2011). *Statistical methods in the atmospheric sciences (3rd ed.)*. Academic press.

WMO. (2012). *Standardized Precipitation Index User Guide* (7 bis, avenue de la Paix — P.O. Box 2300 — CH 1211 Geneva 2 — Switzerland). http://wamis.org/agm/pubs/SPI/WMO_1090_EN.pdf

Zhang, Xuebin & Yang, Feng, (2004). *RClimDex (1.0) User Manual*. Climate Research Branch Environment Canada Downsview, Ontario Canada September 10, 2004
<https://acmad.net/rcc/procedure/RClimDexUserManual.pdf>

Zhang, X., et al. (2005). *Avoiding Inhomogeneity in Percentile-Based Indices of Temperature Extremes*, J. Climate, 18, 1641–1651. doi: 10.1175/JCLI3366.1

ANEXO 1. Indicadores de cambio climático para los trimestres DEF, MAM, JJA y SON

Entre las Figs. 21 a 27 y de las Tablas del 4 al 10 de esta sección se presentan las tendencias anuales calculadas por climpack de los indicadores de cambio climático para los 4 períodos estándar que generalmente analiza la comunidad científica internacional en estudios de clima, variabilidad climática, evidencias y cambio climático: Diciembre-Enero-Febrero (DEF), Marzo-Abril-Mayo (MAM), Junio-Julio-Agosto (JJA) y Septiembre-October-Noviembre (SON) para Temperatura mínima media del aire (TNm), Temperatura media del aire (TMm), Temperatura máxima media del aire (TXm), Porcentaje de días en que temperatura mínima diaria (TN) es < al percentil 10 (TN10p), Porcentaje de días en que la temperatura máxima diaria (TX) es > percentil 90 (TX90p), Rango de temperatura diario (DTR) y Precipitación total anual sobre días húmedos (PRCPTOT).

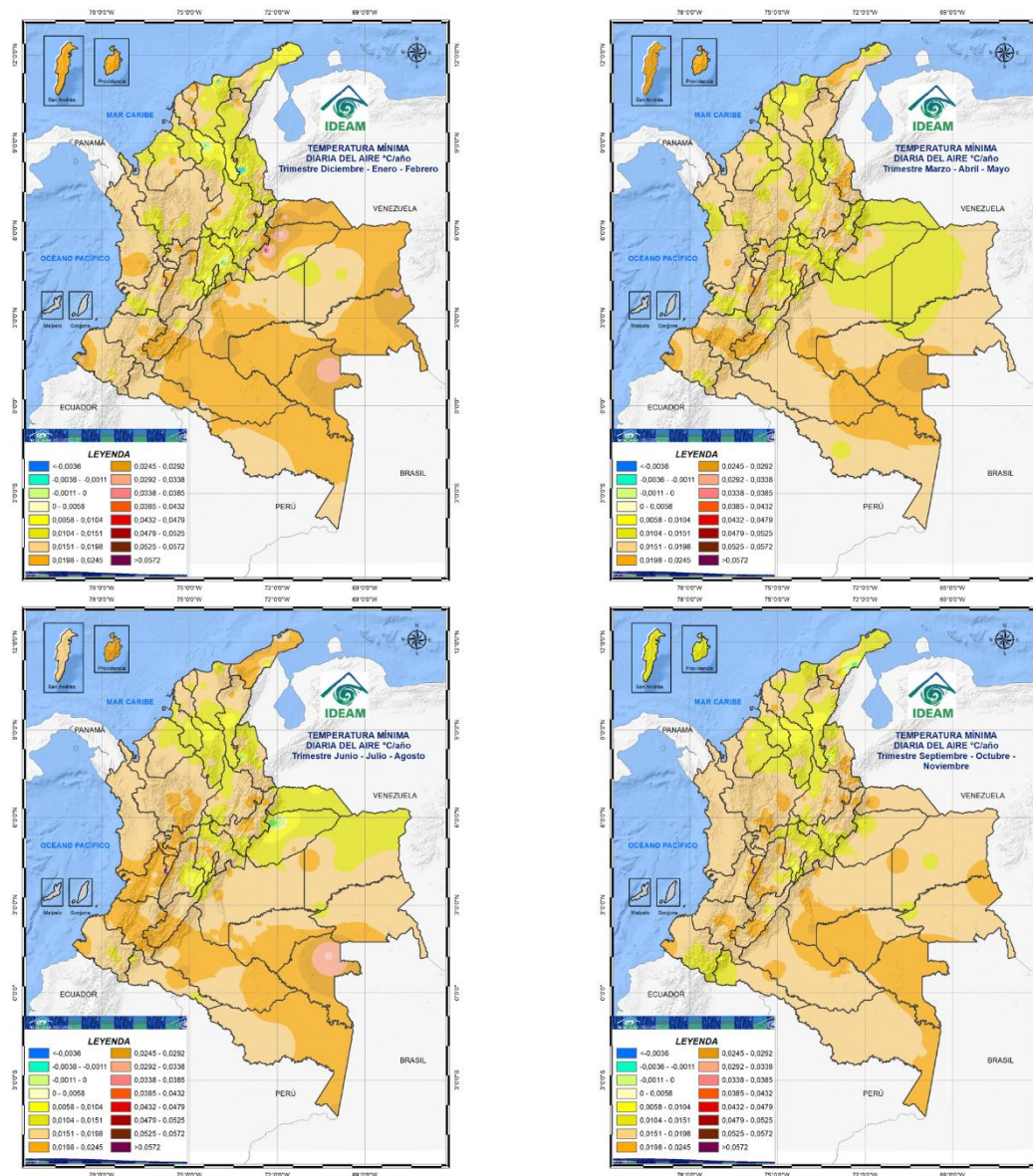


Figura 21. Tendencia anual de la temperatura mínima diaria del aire (TNm) para los períodos DEF, MAM, JJA y SON.

Tabla 4. Tendencia de la temperatura mínima diaria del aire (TNm) en °C/década para los períodos DEF, MAM, JJA y SON calculado para las regiones naturales del país

REGIÓN	DEF	MAM	JJA	SON
Caribe	0,161	0,188	0,193	0,158
Andina	0,197	0,202	0,224	0,214
Pacífico	0,242	0,220	0,242	0,237
Orinoquia	0,276	0,174	0,184	0,225
Amazonia	0,305	0,252	0,277	0,255

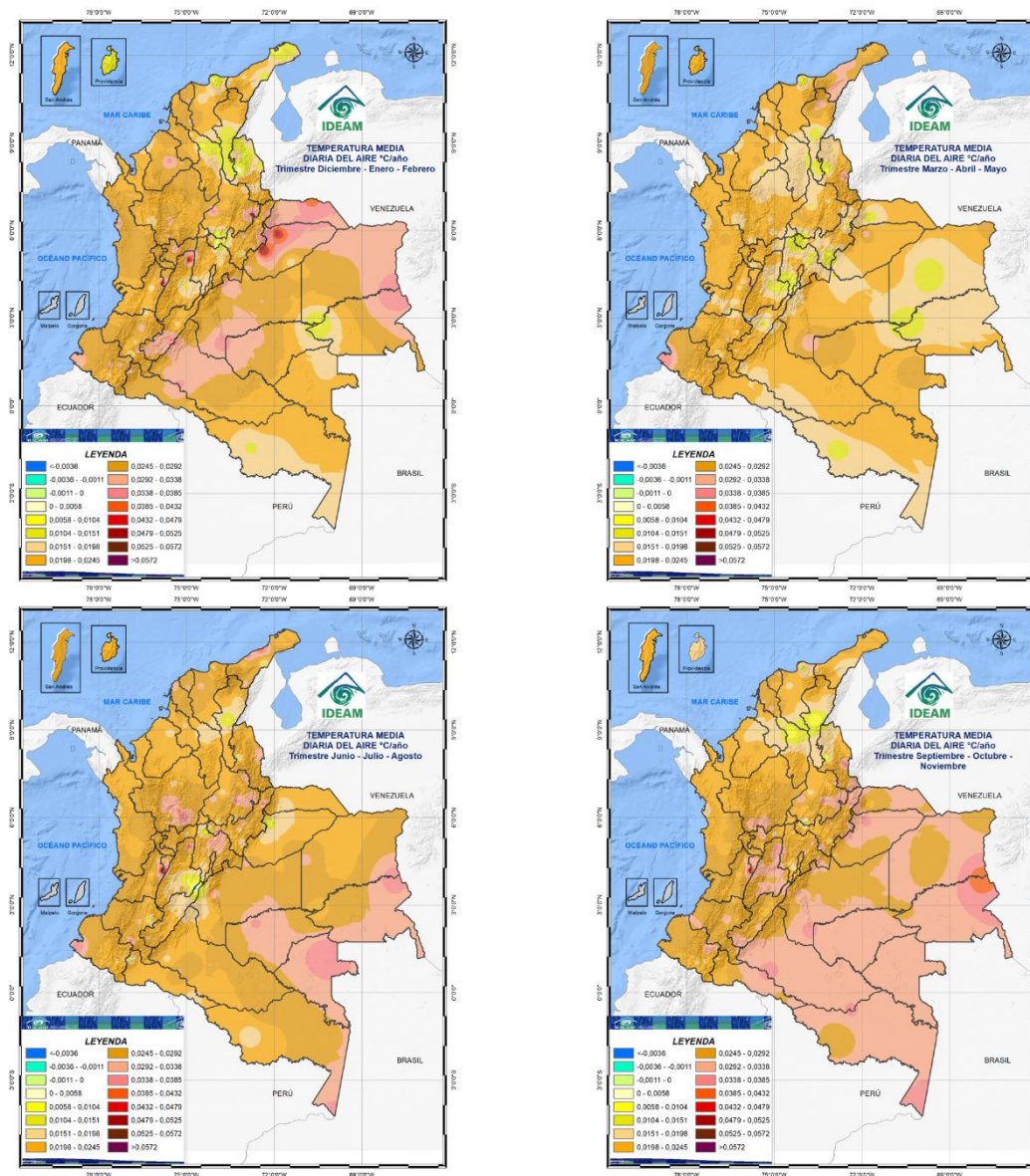


Figura 22. Tendencia anual de la temperatura media del aire (TMm) para los períodos DEF, MAM, JJA y SON.

Tabla 5. Tendencia de la temperatura media diaria del aire (TMm) en °C/década para los períodos DEF, MAM, JJA y SON calculado para las regiones naturales del país

REGIÓN	DEF	MAM	JJA	SON
Caribe	0,217	0,222	0,233	0,100
Andina	0,239	0,205	0,245	1,556
Pacífico	0,254	0,231	0,249	1,469
Orinoquia	0,291	0,196	0,251	0,535
Amazonia	0,238	0,208	0,273	0,152

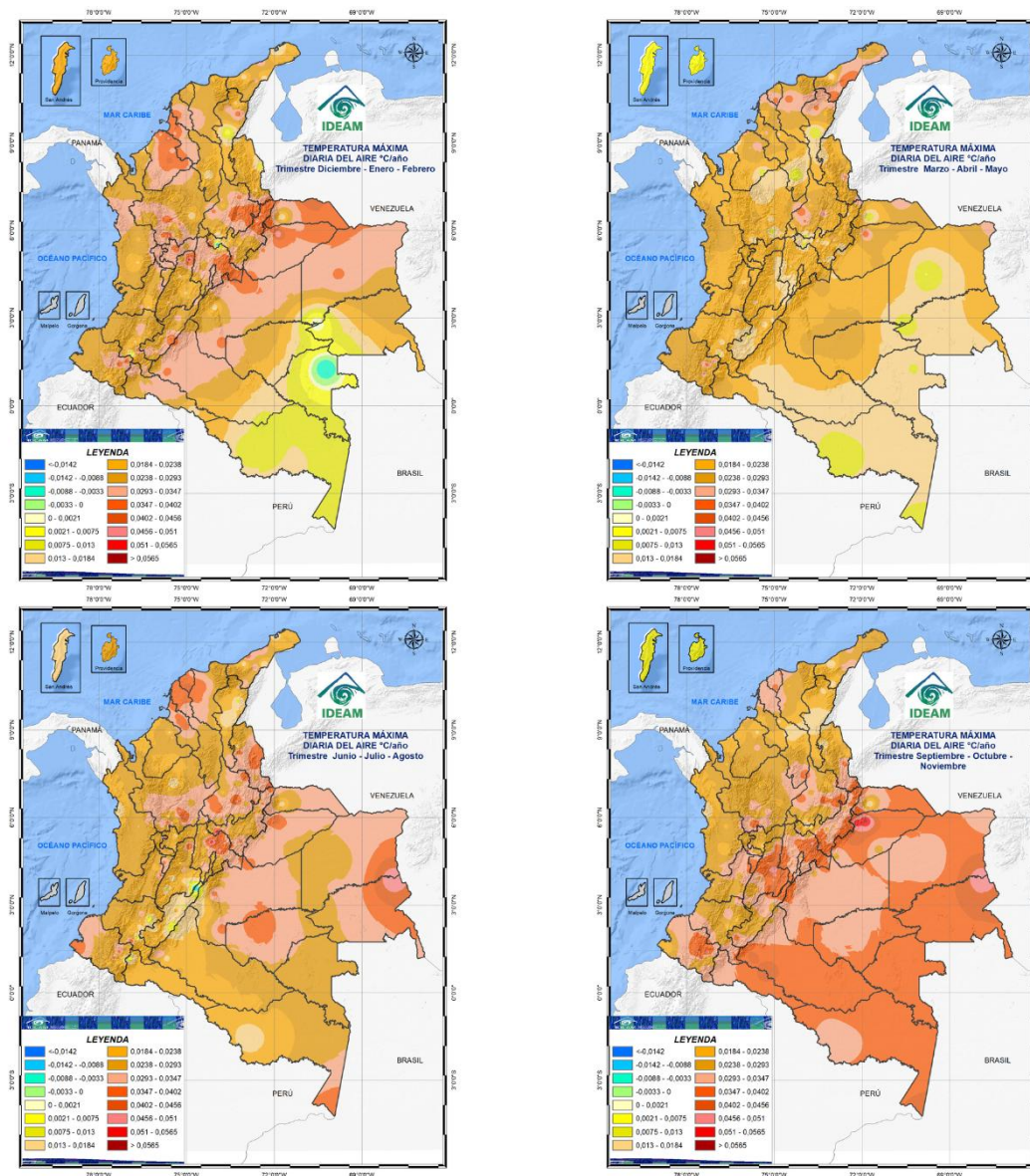


Figura 23. Tendencia anual de la temperatura máxima diaria del aire (TXm) para los períodos DEF, MAM, JJA y SON.

Tabla 6. Tendencia de la temperatura máxima diaria del aire (TXm) en °C/década para los períodos DEF, MAM, JJA y SON calculado para las regiones naturales del país

REGIÓN	DEF	MAM	JJA	SON
Caribe	0,275	0,257	0,270	0,241
Andina	0,278	0,216	0,265	0,301
Pacífico	0,272	0,241	0,261	0,255
Orinoquia	0,307	0,210	0,314	0,353
Amazonia	0,179	0,168	0,272	0,365

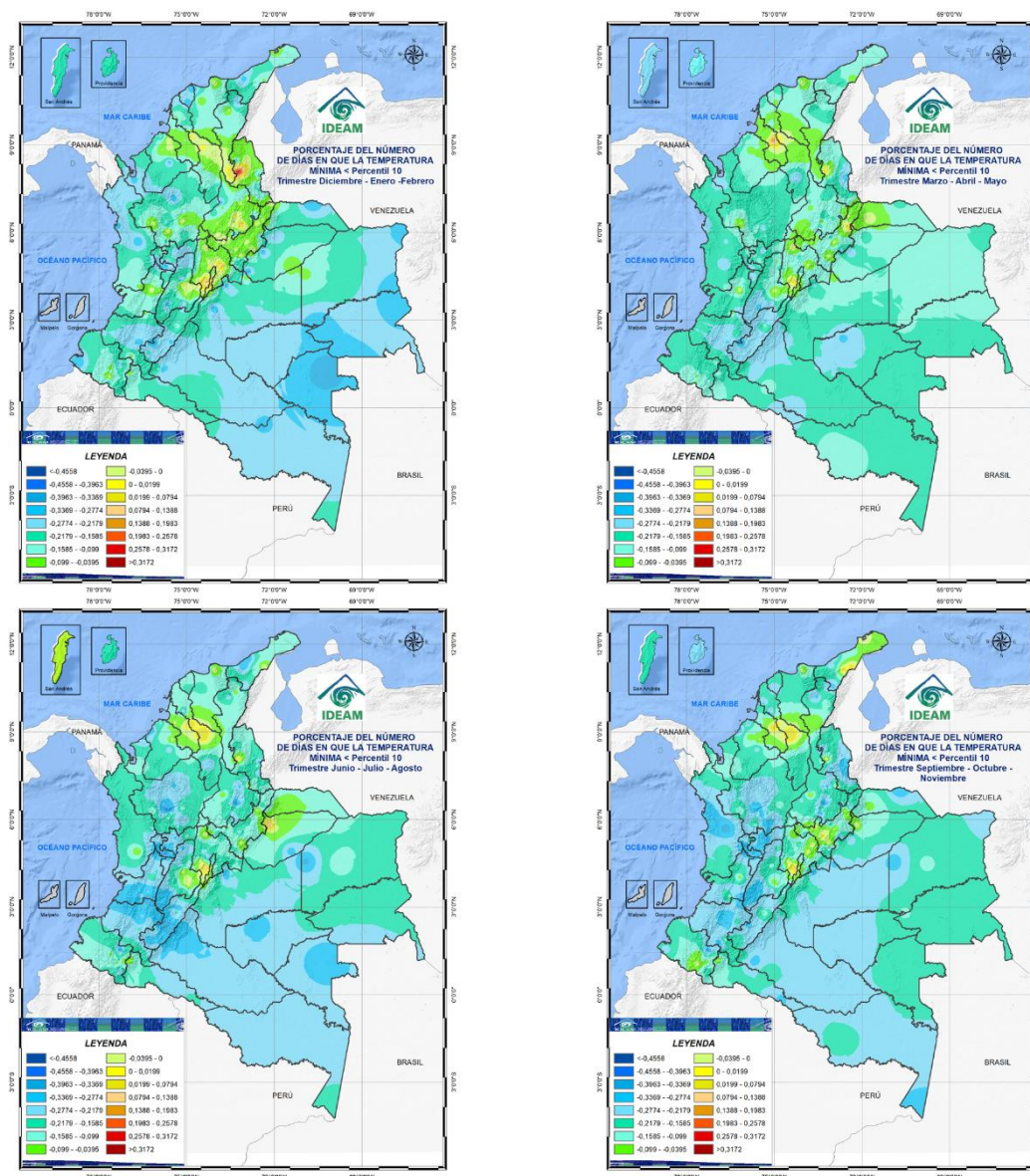


Figura 24. Tendencia anual del porcentaje de días en que la temperatura mínima diaria (TN) es < al percentil 10 (TN10p) para los periodos DEF, MAM, JJA y SON.

Tabla 7. Tendencia de la tasa de porcentaje de días que se presenta la temperatura mínima por debajo del percentil 10 (TN10p) en %/década para los periodos DEF, MAM, JJA y SON calculado para las regiones naturales del país

REGIÓN	DEF	MAM	JJA	SON
Caribe	-1,399	-1,139	-1,330	0,201
Andina	-1,377	-1,622	-1,984	0,257
Pacífico	-2,078	-1,982	-2,018	0,243
Orinoquia	-2,035	-1,475	-1,799	0,295
Amazonia	-2,574	-1,879	-2,426	0,315

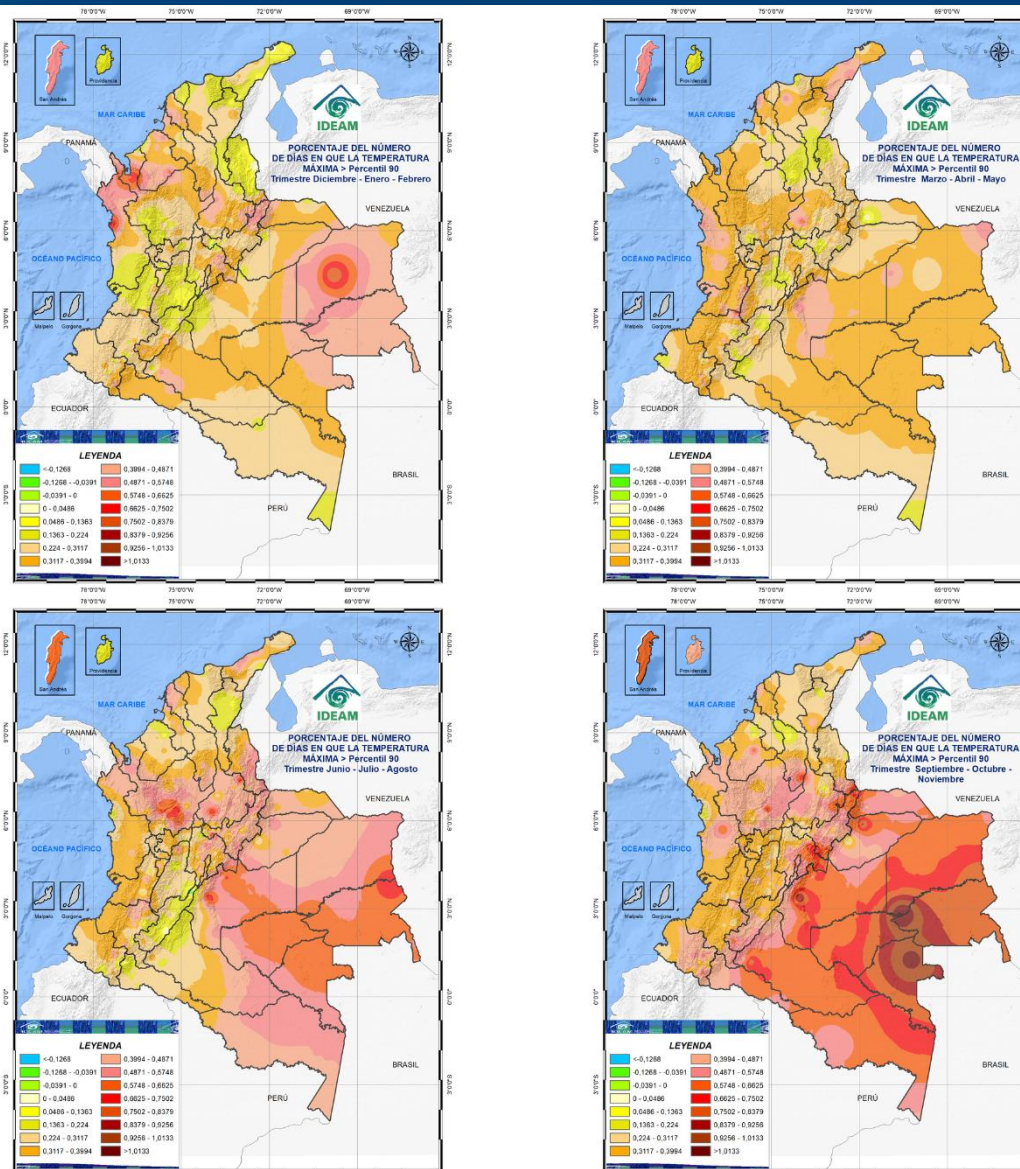


Figura 25. Tendencia anual del porcentaje de días en que la temperatura máxima diaria (TX) es > al percentil 90 (TX90p) para los periodos DEF, MAM, JJA y SON.

Tabla 8. Tendencia de la tasa de porcentaje de días que se presenta la temperatura máxima por encima del percentil 90 (TX90p) en %/década para los periodos DEF, MAM, JJA y SON calculado para las regiones naturales del país

REGIÓN	DEF	MAM	JJA	SON
Caribe	2,847	3,154	2,936	3,080
Andina	2,764	3,013	3,652	4,207
Pacifico	3,573	3,751	3,574	3,871
Orinoquia	4,153	3,461	4,992	6,421
Amazonia	3,360	3,317	4,871	6,993

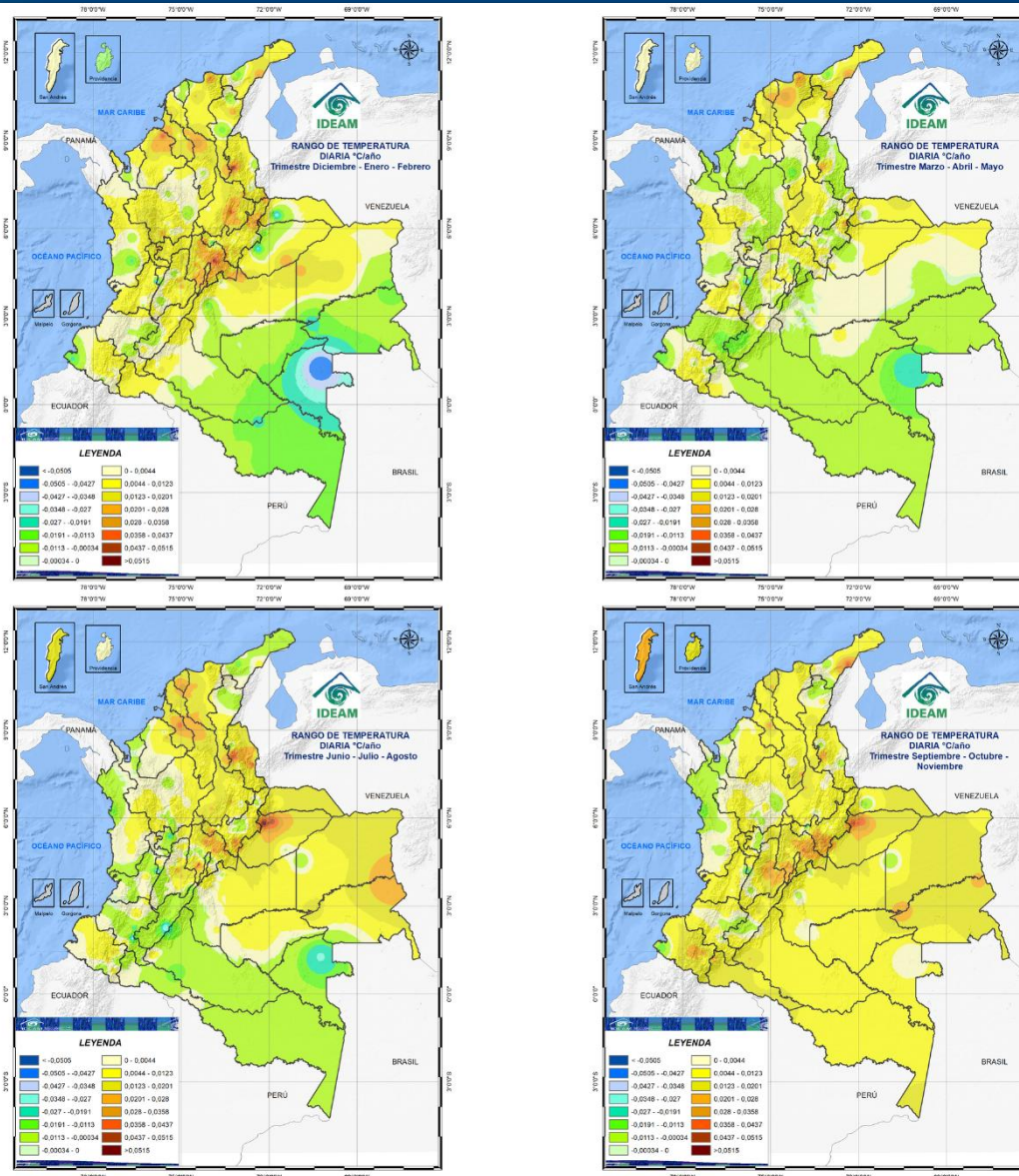


Figura 26. Tendencia anual del rango de temperatura diario (DTR) para los periodos DEF, MAM, JJA y SON.

Tabla 9. Tendencia del rango de temperatura diario (DTR) en °C/década para los periodos DEF, MAM, JJA y SON calculado para las regiones naturales del país

REGIÓN	DEF	MAM	JJA	SON
Caribe	0,106	0,083	0,083	0,080
Andina	0,091	0,011	0,051	0,091
Pacifico	0,016	0,009	0,008	0,006
Orinoquia	0,046	0,027	0,133	0,132
Amazonia	-0,117	-0,064	-0,014	0,101

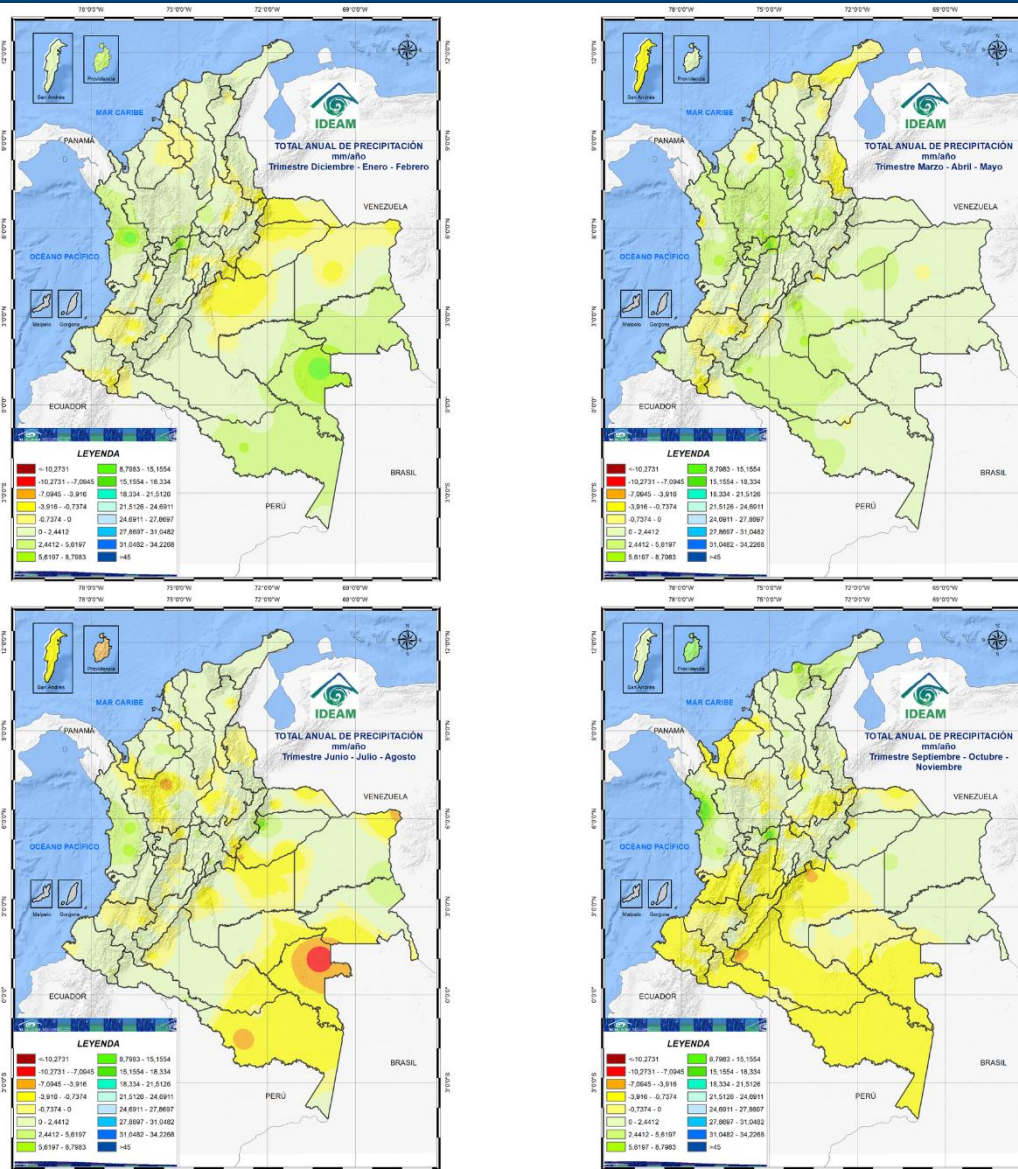


Figura 27. Tendencia anual de la precipitación total anual sobre días húmedos (PRCPTOT) para los periodos DEF, MAM, JJA y SON.

Tabla 10. Tendencia de la precipitación total anual (PRCPTOT) en mm/década para los periodos DEF, MAM, JJA y SON calculado para las regiones naturales del país

REGIÓN	DEF	MAM	JJA	SON
Caribe	1,833	6,865	9,536	0,080
Andina	7,297	16,897	3,102	0,091
Pacífico	24,066	19,948	17,244	0,006
Orinoquia	0,215	17,019	2,283	0,132
Amazonia	28,916	21,281	-10,550	0,101

ANEXO 2. Mapa del régimen pluviométrico de Colombia

Este mapa presenta regiones que comparten características similares en el comportamiento estacional de la precipitación obtenido de un Análisis de Componentes Principales.

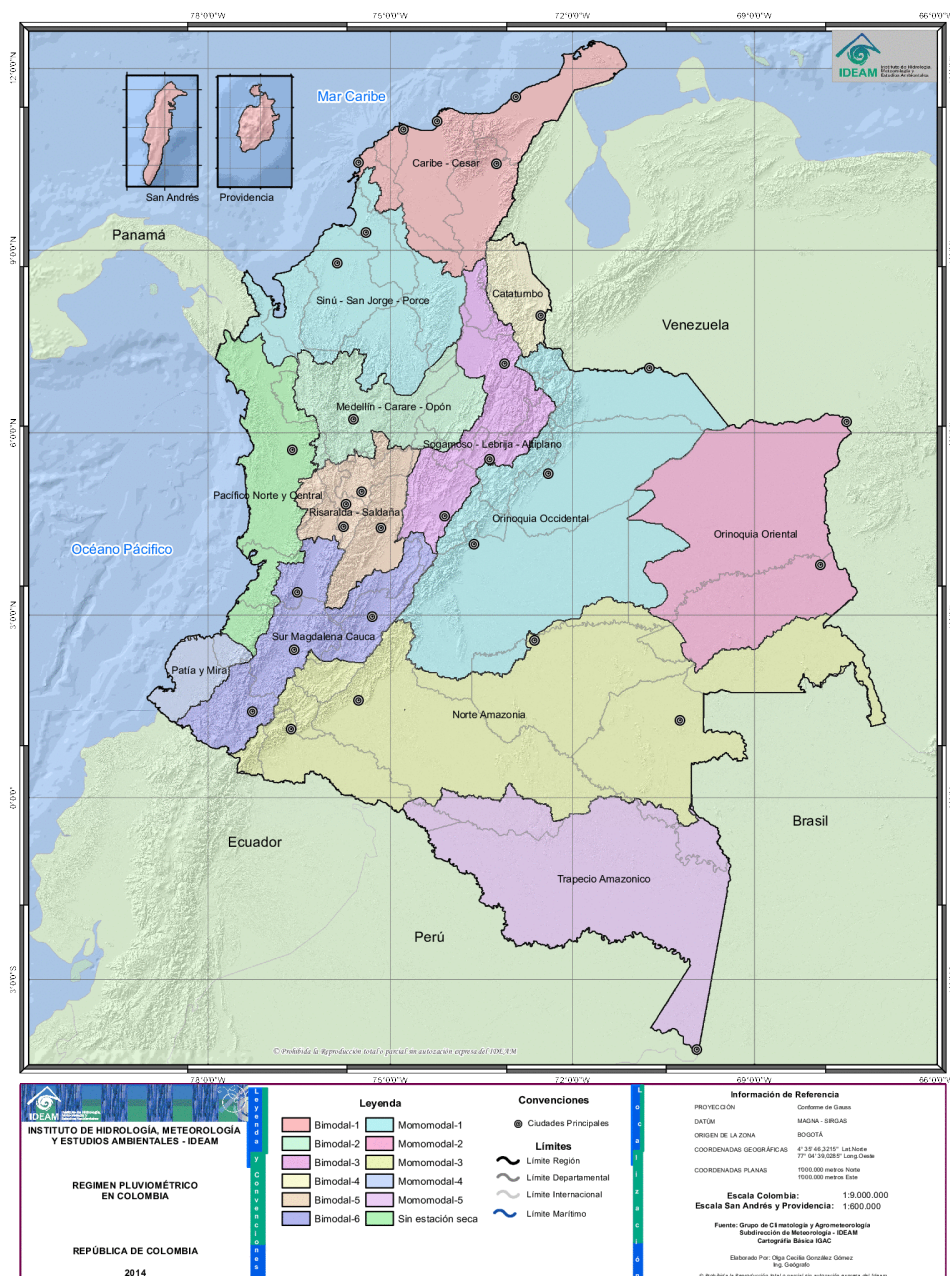


Figura 28. Mapa de régimen pluviométrico de Colombia.