

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

Autores

José Franklyn Ruiz Murcia
Jeimmy Yanelly Melo Franco
Sandra Milena Herrera Aponte
Araminta Vega Burgos

Agradecimiento especial

Dr. José A. Guijarro (Asesor OMM)

**Grupo de modelamiento
numérico de tiempo
y clima**



TENDENCIAS DE CAMBIO CLIMÁTICO PARA LA TEMPERATURA DEL AIRE Y LA PRECIPITACIÓN EN COLOMBIA DURANTE EL PERÍODO 1981-2020 COMO APOORTE A CUARTA COMUNICACIÓN NACIONAL SOBRE CAMBIO CLIMÁTICO USANDO CLIMATOL

RESUMEN

En mayo de 2023 la Organización Meteorológica Mundial invitó a algunos servicios nacionales hidrometeorológicos de ARIII y ARIV a participar en la capacitación de Servicios Climáticos 2 edición que ofreció a través de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET de España) y la Universitat Rovira i Virgili (URV). Uno de los objetivos de ésta capacitación fue compartir el uso de las últimas herramientas desarrolladas por la comunidad científica internacional para realizar control de calidad, homogeneizar y complementar datos a través de registros diarios meteorológicos con fines de estudios climáticos. Por lo anterior, en éste trabajo se utilizó la herramienta Climatol de R para realizar este tipo de tratamiento a las series diarias de precipitación y temperatura (mínima, media y máxima) del aire con el fin de calcular las tendencias y su grado de confianza para el periodo 1981-2020. Como resultado se obtuvo que la temperaturas mínima, media y máxima anual han estado aumentando a una tasa del orden 0.29, 0.23 y 0.25 °C/década respectivamente y, sus valores son estadísticamente significativos con un grado de confianza del orden del 95%. Se aplicó un análisis de extrapolación de tendencias a dichos datos y se encontró que sus valores son similares a los presentados por el escenario de cambio climático SSP5-8.5 ya que se podrían alcanzar aumentos de 1.0, 1.5, 2.0 y 2.5°C hacia el 2040, 2060, 2080 y 2100 correspondientemente con respecto al clima actual. Por otra parte, el análisis de los datos sugiere que la precipitación anual ha estado aumentando en la mayor parte del país a una tasa de 24 mm/década; sin embargo, este resultado varía espacialmente y no es estadísticamente significativo puesto que, en la mayoría de las estaciones consideradas, el p-value, indicador del grado de confianza estadística, fue igual o superior a 0.4. Situación similar ocurre con los resultados mensuales. En dicha escala, enero, julio, agosto y septiembre fueron los únicos meses que a nivel nacional presentaron tendencia negativa de la precipitación con tasas de disminución de -4.96, -1.55, -8.06, y 7.80 mm/década respectivamente.

Palabras clave: *Climatol, cambio climático, clima.*

ABSTRACT

In May 2023, the World Meteorological Organization invited some national hydrometeorological services from ARIII and ARIV to participate in the Climate Services 2 edition training offered through the Agencia Estatal de Meteorología (AEMET of Spain) and the Rovira i Virgili University (URV). One of the objectives was to share the use of the latest tools developed by the international scientific community to carry out quality control, homogenize and complement data through daily meteorological records with fine climate studies. Therefore, the Climatol R tool was used to perform this type of treatment on the daily series of precipitation and temperature (minimum, mean and maximum) of the air in order to calculate the trends and their degree of confidence for the period 1981-2020. As a result, it was obtained that the annual minimum, mean and maximum temperatures have been increasing at a rate of the order of 0.29, 0.23 and 0.25 °C/decade respectively and their values are statistically significant with a 95% confidence level. A trend extrapolation analysis was applied and it was found that their values are similar of the SSP5-8.5 climate change scenario since the mean temperature increases 1.0, 1.5, 2.0 and 2.5°C towards 2040, 2060, 2080 and 2100 respectively with respect to the current climate. Furthermore, data analysis suggests that annual precipitation has been increasing in most parts of the country at a rate of 24 mm/decade; However, this result varies spatially and is not statistically significant since in the largest of the stations considered the p-value, indicator of the statistical confidence degree used here, was equal to or greater than 0.4. A similar situation occurred with the monthly results. In this monthly scale, January, July, August and September presented a negative trend in precipitation with values of -4.96, -1.55, -8.06, and 7.80 mm/decade respectively.

Key words: *Climatol, climate change, climatology.*

Contenido

1. Introducción	4
2. Datos y metodología	6
3. Resultados y discusión	9
3.1. <i>Tendencias de temperatura del aire y precipitación en Colombia</i>	<i>9</i>
3.2. <i>Escenario de extrapolación de tendencias para la temperatura del aire</i>	<i>10</i>
Conclusiones	29
Referencias Bibliográficas	30

1. Introducción

Uno de los grandes desafíos que enfrentan los servicios hidrometeorológicos nacionales es la generación de evidencias de cambio climático a partir de las series históricas de las diferentes variables meteorológicas. El foco del problema radica en la calidad de los datos como punto de partida para generar dichas evidencias; datos que generalmente pueden presentar inhomogeneidades por distintas razones, entre ellas: reubicación y emplazamiento de las estaciones meteorológicas, cambio en el entorno local, cambio en los instrumentos, cambio de observador, cambios en los procedimientos de observación, cambios en el procesamiento de datos y errores de digitalización y bases de datos, entre otros (OMM, 2020).

Desde hace tiempo, metodologías para tratar de corregir dichas inhomogeneidades han sido tratadas por varios autores como Cucconi O (1968), Sokal RR & Rohlf PJ (1969), Alexandersson H (1986), Peterson TC et. al, (1998), Aguilar et. al., (2003), Khaliq MN & Ouarda TBMJ (2007) y Venema et al (2012). Sin embargo, en 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, la Organización Meteorológica Mundial (WMO, por sus siglas en inglés) recomendó a los servicios hidrometeorológicos pertenecientes a las regiones ARIII y ARIV de la OMM, estandarizar la elaboración de esta tarea con el uso de la herramienta Climatol implementada por Guijarro J. A. (2023), ya que aparte de incorporar y mejorar el conocimiento adquirido por los autores antes mencionados, esta herramienta permite corregir las inhomogeneidades de las series de datos diarios y realizar la complementación de los mismos y una vez hecho esto, calcula las tendencias de cambio climático y evalúa el grado de significancia estadística a través del estadístico p-value. Otra ventaja con la que cuenta esta herramienta es que se puede ejecutar para cualquier variable meteorológica con disponibilidad de datos diarios de las estaciones que participen del análisis, distinto a RClimDex y su versión mejorada Climact (<https://climact-sci.org/indices/>), puesto que estas últimas hacen cálculos solamente a partir de los datos diarios de precipitación y de las temperatura máxima y mínima (Zhang Xuebin & Yang Feng, 2004); no obstante, es importante entender que el objetivo de estos 2 últimos paquetes de R (RClimDex y Climact) es calcular indicadores de cambio climático basado en estas 3 variables meteorológicas. Finalmente, un plus adicional que presenta Climatol es su capacidad de establecer regiones homogéneas para la variable meteorológica de interés, basada en un análisis de clúster; así como, la generación de climatologías para el período de tiempo de referencia elegido no solo en términos de promedios, sino también en términos de los percentiles que sean requeridos.

Frente a tendencias de precipitación y temperaturas en Centroamérica y norte de Suramérica, Aguilar, et. al, (2005) encontraron que para la serie 1961-2003 hay una tendencia general al calentamiento en la región. La ocurrencia de temperaturas máximas y mínimas extremadamente cálidas han aumentado, mientras que, los eventos de temperaturas extremadamente fríos han disminuido. Los índices de precipitación, a pesar de la gran variabilidad espacial esperada, indican que, aunque no se encuentran aumentos significativos en la cantidad total, los eventos de lluvia se están intensificando y la contribución de los días húmedos y muy húmedos está aumentando. En

Colombia, [Benavides et. al, \(2007\)](#) presenta posiblemente el único trabajo con resultados de tendencias y cálculos de indicadores de cambio climático; en donde expresa que, en la mayoría de las estaciones hay una tendencia al aumento de las precipitaciones de alta intensidad (tormentas o aguaceros), excepto en Bucaramanga y Pasto. Las estaciones que presentan mayor significancia estadística son Medellín, Santa Marta y Leticia. Adicionalmente, menciona que, en la mayoría de las estaciones, hay una tendencia al aumento de las temperaturas máximas y mínimas; lo que quiere decir que, tanto las noches como los días son más cálidos. La anterior señal no es muy clara en ciudades como San Andrés, Santa Marta, Leticia, Gaviotas, Puerto Carreño, Barrancabermeja, Cali, Medellín, Armenia, Popayán, Pasto, Tibaitata. En estas ciudades, generalmente la señal es débil, ya sea en el comportamiento de la temperatura máxima o de la temperatura mínima; solo en 4 ciudades (Puerto Carreño, Gaviotas, Barrancabermeja y Tibaitata) la señal no es clara para el análisis de ambas temperaturas.

2. Datos y metodología

Con el fin de calcular las tendencias de cambio climático, inicialmente se descargaron de la base de datos del Ideam (DHIME), los datos diarios disponibles de precipitación y temperatura del conjunto de estaciones que hacen parte del sistema de asimilación de datos para realizar la predicción climática por parte del Grupo de Modelamiento Numérico de tiempo y Clima; es decir, para el caso de precipitación se consideraron 848 estaciones, 227 para temperatura media del aire, y 215 estaciones tanto para temperatura máxima media como para la temperatura mínima media.

Una vez realizado lo anterior, se procedió a generar la descarga de la versión 4 de la herramienta Climatol desde <https://cran.r-project.org/web/packages/climatol/index.html>, versión que cuenta con las funciones para realizar: la lectura del archivo que contiene la información del conjunto de estaciones que hacen parte del análisis, la lectura de cada uno de los archivos con datos diarios para cada una de las estaciones reportadas en el archivo anterior, la homogeneización, la corrección de datos diarios, la complementación de los mismos, la construcción de los valores mensuales de las variables meteorológicas de interés y los cálculos de tendencia con su respectiva significancia estadística. Sin embargo, el autor de Climatol realiza para Ideam una modificación a dicho código con el fin de facilitar la lectura de los datos diarios con la estructura que se obtiene de los archivos descargados para cada una de las estaciones de la base de datos de Ideam (DHIME). Finalmente, se procede a ejecutar el paquete de R climatol (versión 4) siguiendo las recomendaciones de la guía (Guijarro, JA; 2023) tal como sigue (más información, en la documentación de R):

Una vez cargada la librería Climatol en R y fijada la carpeta de trabajo en el ordenador, se realizó la lectura del archivo de datos que contiene la información del conjunto de estaciones que participan del análisis. Para el caso de precipitación se realizó así:

```
source('clihomog.R')  
daily2climatol('Estaciones.csv', datcol=1:2, varcli='Prec', sep='|', dec='.', head=TRUE)
```

Para ello es importante que el archivo de estaciones (Estaciones.csv) luzca de la siguiente manera:

```
Fichero|Longitud|Latitud|Altitud|Codigo|Nombre estacion  
PTPM_CON@11010010.data|-76.54472|5.45894|98|11010010|VUELTA LA [11010010]  
PTPM_CON@11020010.data|-76.14208|5.90853|1850|11020010|CARMEN DE ATRATO [11020010]  
PTPM_CON@11020050.data|-76.25086|5.75767|715|11020050|PINON EL [11020050]  
PTPM_CON@11030010.data|-76.61000|5.38000|72|11030010|CERTEGUI [11030010]  
PTPM_CON@11030030.data|-76.72814|5.33417|64|11030030|MANAGRU [11030030]  
PTPM_CON@11030040.data|-76.74086|5.48161|35|11030040|PAIMADO [11030040]  
PTPM_CON@11035010.data|-76.58000|5.51000|41|11035010|LLORO [11035010]  
PTPM_CON@11035020.data|-76.74972|5.62617|53|11035020|SAN ISIDRO [11035020]  
PTPM_CON@11040010.data|-76.53781|5.74361|54|11040010|TUTUNENDO [11040010]
```

Donde a manera de ejemplo se muestra el caso de las primeras 10 estaciones de las 848 que se utilizaron para los cálculos de la precipitación. Como se observa, la primera columna presenta el nombre del archivo correspondiente al nombre del archivo donde están los datos diarios de precipitación para la estación con código 11010010; la cual en la base de datos DHIME del Ideam se

descarga con el siguiente nombre [PTPM_CON@11010010.data](#) y la siguiente estructura de datos diarios:

```
Fecha | Valor
1980-02-01 07:00:00 | 30.0
1980-02-02 07:00:00 | 0.0
1980-02-03 07:00:00 | 35.0
1980-02-04 07:00:00 | 0.0
1980-02-05 07:00:00 | 0.0
1980-02-06 07:00:00 | 0.0
1980-02-07 07:00:00 | 31.0
1980-02-08 07:00:00 | 0.0
1980-02-09 07:00:00 | 35.0
```

El siguiente paso fue especificar en la función **homogen** la abreviatura de la variable meteorológica y los años inicial y final que se requieren para el análisis; en este caso particular, las abreviaturas que se designaron fueron Prec para precipitación, Tmed para la temperatura media, Tmax para la temperatura máxima media y Tmin para la temperatura mínima media. Por otro parte, se trabajó la serie 1981–2020 para las 4 variables meteorológicas mencionadas a pesar de que climatol se percata que hay series de precipitación que inician desde 1910 y de temperatura que inician desde 1967.

```
datsubset('Prec', 1910, 2023, 1981, 2020)
```

Tal como lo explica [Guijarro, J.A \(2023\)](#), la función **homogen** calcula la frecuencia de los datos (subdiarios, diarios, mensuales, bimestrales, trimestrales, semestrales o anuales) a partir de los datos presentes en el período comprendido entre los años inicial y final.

```
homogen('Prec', 1981, 2020)
```

Pero como la elevada variabilidad de los datos diarios (o subdiarios) dificulta mucho la detección de cambios en media, la homogenización directa de dichos datos no está aconsejada, y por eso el ejemplo anterior con la variable Prec genera un error aconsejando homogeneizar primero sus datos mensuales, cuyos archivos se obtienen fácilmente mediante la función **dd2m**. No obstante, antes de generar los datos mensuales conviene comprobar la calidad de los diarios, para lo que podemos usar la opción **onlyQC=TRUE**:

```
homogen('Prec', 1981, 2020, onlyQC=TRUE)
dd2m('Prec', 1981, 2020, valm=1)
```

Es importante indicar que **valm=1** es para calcular totales mensuales en lugar de valores medios (**valm=2**), este último fue útil para las temperaturas. Una vez corregidos los errores más evidentes de las series, se obtuvieron los archivos de datos mensuales y se homogeneizaron sus series, así:

```
homogen('Prec-m', 1981, 2020)
```

Si se hubieran detectado saltos en la media habría convenido editar las fechas de corte para ajustarlas a eventos del historial de las estaciones (metadatos) que justificasen los cambios detectados, para finalizar ajustando las series diarias mediante:

```
homogen('Prec', 1981, 2020, nref=1, metad=TRUE)
```

En esta función, **nref** se refiere al número máximo de datos próximos a usar para estimar los de la serie problema. 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 con 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.

Así mismo en la función **homogen**, se configura **metad=TRUE** con el fin de que se use el archivo de puntos de quiebre como metadata; ya que nuevamente conviene revisar los resultados para comprobar si ha habido algún problema.

Finalmente, este paquete de R permite obtener productos como series de tiempo complementadas y resúmenes estadísticos a partir de los datos homogeneizados con funciones de post-proceso como **dahstat** y **dahgrid** para facilitar la obtención de productos de uso corriente. Las series homogeneizadas pueden volcarse a 2 archivos de texto *.csv mediante la función **dahstat** especificando el parámetro **stat='series'**.

```
dahstat('Prec', 1981, 2020, stat='series')
```

Esta función genera 2 archivos *.csv. Los llamados *_series.csv que contienen las series complementadas, mientras que en los *_flag.csv aparecen códigos que indican si dichos datos fueron observados, rellenados (ausentes originalmente) o corregidos (por inhomogeneidades o por excesiva anomalía).

Los resúmenes estadísticos se crean con la misma función:

```
dahstat('Prec', 1981, 2020)
```

Similarmente, con el objetivo de calcular las tendencias de cambio climático, se configura **stat='tnd'** a fin de obtener los archivos de tendencia con su significancia estadística (p-value).

```
dahstat('Prec', 1981, 2020, stat='tnd')
```


3. Resultados y discusión

3.1. Tendencias de temperatura del aire y precipitación en Colombia

Los resultados de aplicar la metodología descrita anteriormente indican en general que, la temperatura del aire en Colombia ha estado aumentando durante el período 1981-2020 y que hay fuerte confianza de sus resultados; ya que en gran parte del país y para las tres variables que la caracterizan (mínima, media y máxima) sus resultados son estadísticamente significativos puesto que el valor de p-value en la gran mayoría de los casos es menor a 0.05 (95% de confianza) tal como lo muestran las Figs. 1, 2, 3, 4, 5 y 6 para el caso anual, y las Figs. 7, 8, 9, 10, 11 y 12 para el caso estacional.

La Tabla 1 presenta a nivel nacional dichas tendencias a nivel mensual y anual. En particular muestra que la temperatura mínima del aire en Colombia ha estado aumentando a una tasa de 0.29°C/década, mientras que, la temperatura media del aire en 0.23°C/década y, la temperatura máxima del aire en 0.25°C/década; reafirmado los resultados de [Benavides et. al, \(2007\)](#) donde indica que tanto las noches como los días en Colombia se han tornado más cálidos.

Tabla 1. Tendencia decadal de la temperatura y precipitación en Colombia a nivel mensual y anual

TENDENCIA DECADAL 1981 - 2020													
	MES												
VARIABLE	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
MIN (°C/década)	0.28	0.28	0.3	0.3	0.34	0.34	0.29	0.28	0.28	0.33	0.22	0.2	0.29
MED (°C/década)	0.22	0.21	0.24	0.25	0.25	0.25	0.22	0.23	0.23	0.26	0.18	0.16	0.23
MAX (°C/década)	0.25	0.23	0.28	0.29	0.24	0.24	0.26	0.25	0.25	0.27	0.24	0.25	0.25
PREC (mm/década)	-4.96	11.76	0.93	2.1	3.72	3.6	-1.55	-8.06	-7.8	11.78	5.7	1.86	21.9

Frente a la precipitación, la salida del algoritmo aplicado con Climatol indica que anualmente la precipitación en Colombia ha estado aumentando a una tasa de 21.9mm/década; sin embargo, es un resultado que hay que revisar con cuidado por 2 aspectos:

El primero es que este valor no es representativo para todas las estaciones pluviométricas del país; la Fig. 13 muestra que las mayores tendencias de precipitación se han dado particularmente hacia el norte y centro de la región Pacífica y algunos puntos de los Llanos Orientales y la Amazonía. Para gran parte del territorio colombiano este valor de tendencia se ubica entre 1 y 10 mm/década y, hay sectores donde se presentan tendencias negativas como en sectores de Norte de Santander, noreste de Antioquia, centro de Huila, oeste de Nariño, Oeste de Arauca, suroeste de Casanare, oeste de Meta, oeste de Putumayo y oriente de Vaupés donde han disminuido a una tasa de entre 5 y 12.5 mm/década.

El segundo y, como lo presenta la Fig. 14, es que el resultado no es estadísticamente significativo y, por lo tanto, no es confidente; ya que para la mayor parte de las estaciones analizadas el p-value se ubica con valores superiores a 0.4 y esto podría deberse (como hipótesis) a que la señal de variabilidad interanual (ENOS) modula en gran medida las alteraciones de precipitación de año a año sobre el territorio nacional y no responde tanto la señal de más baja frecuencia con respecto a la variabilidad interanual asociada al cambio climático mismo.

Teniendo en cuenta las salvedades anteriores, los resultados mensuales de la tendencia de la precipitación en Colombia indicaron que los meses de enero, julio, agosto y septiembre resolvieron valores negativos con tasas de disminución de 4.96, 1.55, 8.06, 7.80 mm/década respectivamente tal como se presenta en la Tabla 1. Para los restantes 8 meses del año la tendencia fue positiva, es decir, que la precipitación decadal ha estado aumentando en el tiempo. Las Figs. 15 y 16 presentan como han sido estos cambios a nivel espacial sobre territorio colombiano a lo largo de los meses del año.

3.2. Escenario de extrapolación de tendencias para la temperatura del aire

De acuerdo con Ruiz & Melo (2023), bajo un escenario de cambio climático pesimista (SSP5-8.5) y con técnicas de downscaling estadístico usando los mejores modelos propuesto por el CMIP6 para Colombia, la temperatura media del aire aumentaría a nivel nacional 0.6°C para el período 2011-2040, 1.0°C para el período 2041-2060 y 2.2°C para 2081-2100 con respecto a la climatología de referencia 1981-2010.

Realizando una extrapolación de la tendencia de la temperatura media del aire encontrada en este trabajo a nivel anual, y como lo muestra la Tabla 3, se encuentra que hacia el 2040 se alcanzaría un aumento de 1.0°C, 1.5°C hacia el 2060, 2.0°C al 2080 y de 2.5°C al 2100. Si bien es cierto que estos datos hay que considerarlos con sumo cuidado debido al comportamiento no lineal de las variables meteorológicas, si pone de manifiesto que la temperatura del aire en Colombia podría estar aumentando a tasas de cambio comparables con dicho escenario pesimista de cambio climático (SSP5-8.5). Adicionalmente, estos resultados “coinciden” en que el escenario de 1.5°C en Colombia se estaría alcanzando alrededor del año 2060 mientras que el de 2.0°C hacia el 2080.

Con respecto a la temperatura mínima, la extrapolación de tendencia indica que los aumentos son similares a los que se presentan con la temperatura media del aire para lo que resta del siglo XXI; sin embargo, en el caso de la temperatura máxima, los aumentos con respecto a clima presente son de 1.16°C, 1.74°C, 2.32°C y 2.90°C para 2040, 2060, 2080 y 2100 respectivamente, tal como se muestra en tablas 2 y 4 respectivamente.

Tabla 2. Escenario de extrapolación de tendencia para la temperatura mínima

AUMENTO DE LA TEMPERATURA MÍNIMA EN LO QUE RESTA DEL SIGLO XXI				
MESES	Tmin al 2040	Tmin al 2060	Tmin al 2080	Tmin al 2100
1	1	1.5	2	2.5
2	0.92	1.38	1.84	2.3
3	1.12	1.68	2.24	2.8
4	1.16	1.74	2.32	2.9
5	0.96	1.44	1.92	2.4
6	1	1.5	2	2.5
7	1.04	1.56	2.08	2.6
8	1	1.5	2	2.5
9	0.96	1.44	1.92	2.4
10	1.08	1.62	2.16	2.7
11	0.96	1.44	1.92	2.4
12	1	1.5	2	2.5
ANUAL	1	1.5	2	2.5

Tabla 3. Escenario de extrapolación de tendencia para la temperatura media del aire

AUMENTO DE LA TEMPERATURA MEDIA EN LO QUE RESTA DEL SIGLO XXI				
MESES	Tmed al 2040	Tmed al 2060	Tmed al 2080	Tmed al 2100
1	1	1.5	2	2.5
2	0.92	1.38	1.84	2.3
3	1.12	1.68	2.24	2.8
4	1.16	1.74	2.32	2.9
5	0.96	1.44	1.92	2.4
6	1	1.5	2	2.5
7	1.04	1.56	2.08	2.6
8	1	1.5	2	2.5
9	0.96	1.44	1.92	2.4
10	1.08	1.62	2.16	2.7
11	0.96	1.44	1.92	2.4
12	1	1.5	2	2.5
ANUAL	1	1.5	2	2.5

Tabla 4. Escenario de extrapolación de tendencia para la temperatura máxima

AUMENTO DE LA TEMPERATURA MÁXIMA EN LO QUE RESTA DEL SIGLO XXI				
MESES	Tmax al 2040	Tmax al 2060	Tmax al 2080	Tmax al 2100
1	1.12	1.68	2.24	2.8
2	1.12	1.68	2.24	2.8
3	1.2	1.8	2.4	3
4	1.2	1.8	2.4	3
5	1.36	2.04	2.72	3.4
6	1.6	2.4	3.2	4
7	1.16	1.74	2.32	2.9
8	1.12	1.68	2.24	2.8
9	1.2	1.8	2.4	3
10	1.32	1.98	2.64	3.3
11	0.88	1.32	1.76	2.2
12	0.8	1.2	1.6	2
ANUAL	1.16	1.74	2.32	2.9

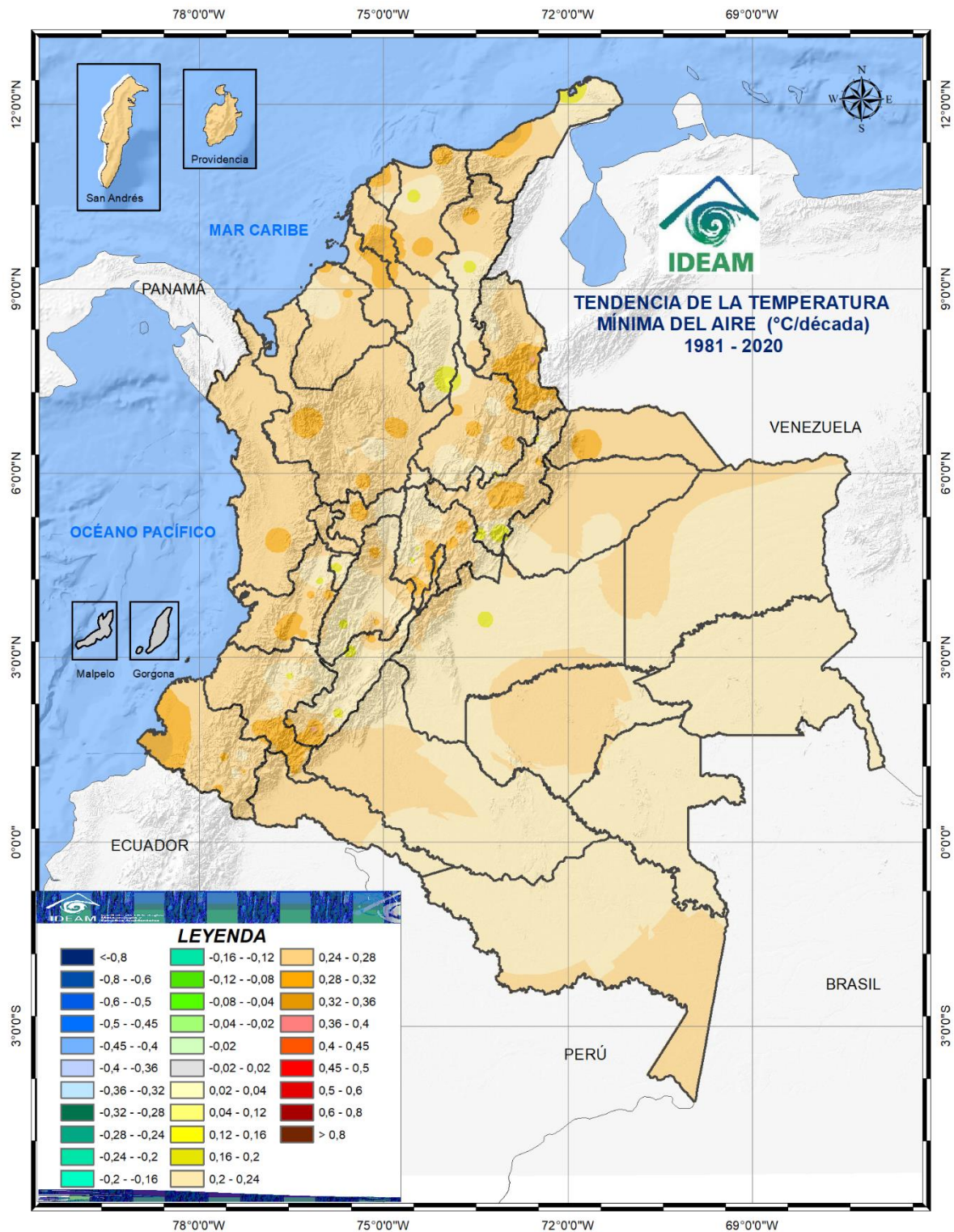


Figura 1. Tendencia de la temperatura mínima anual del aire (°C/década) para el periodo 1981-2020.

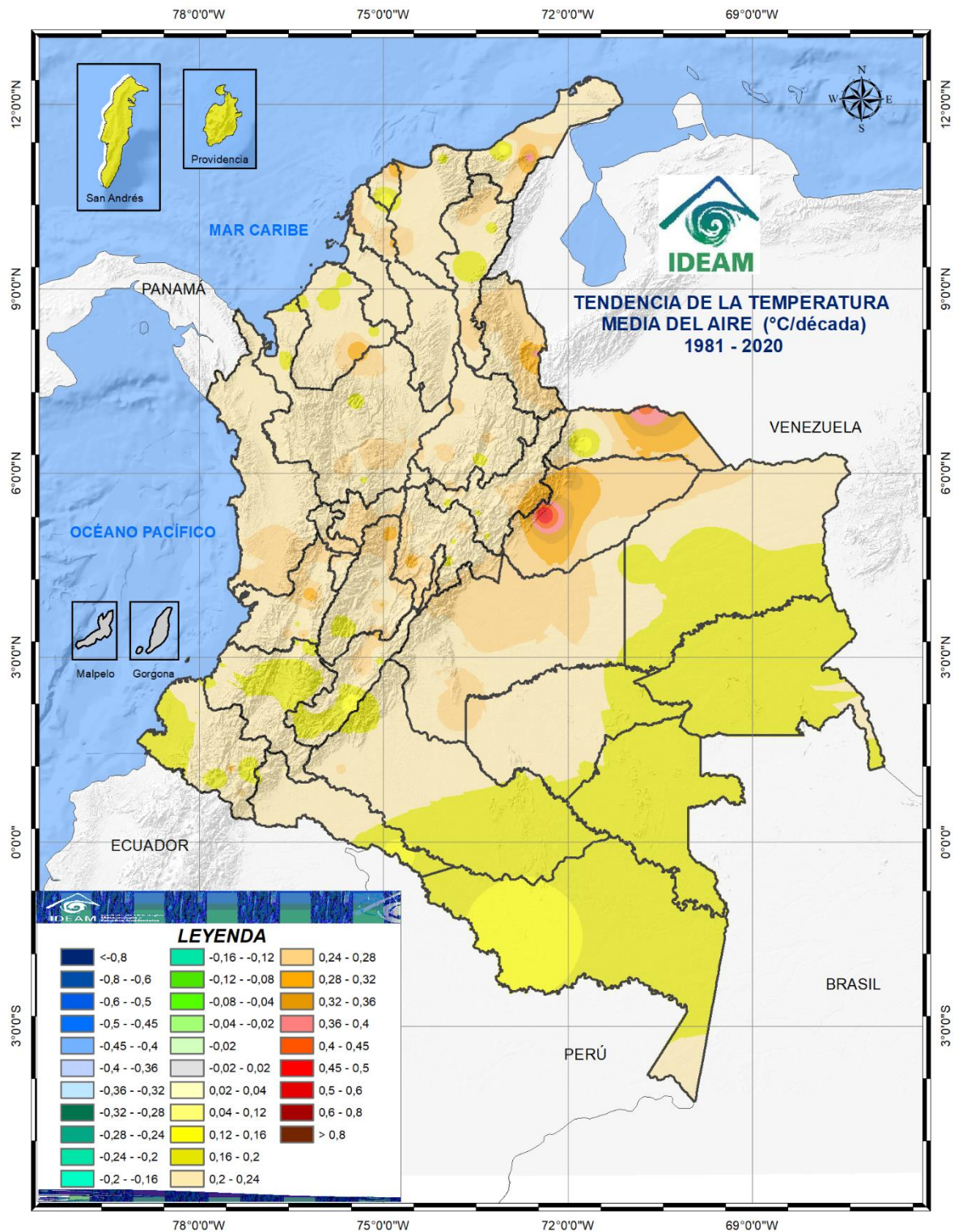


Figura 2. Tendencia de la temperatura media anual del aire (°C/década) para el periodo 1981-2020.

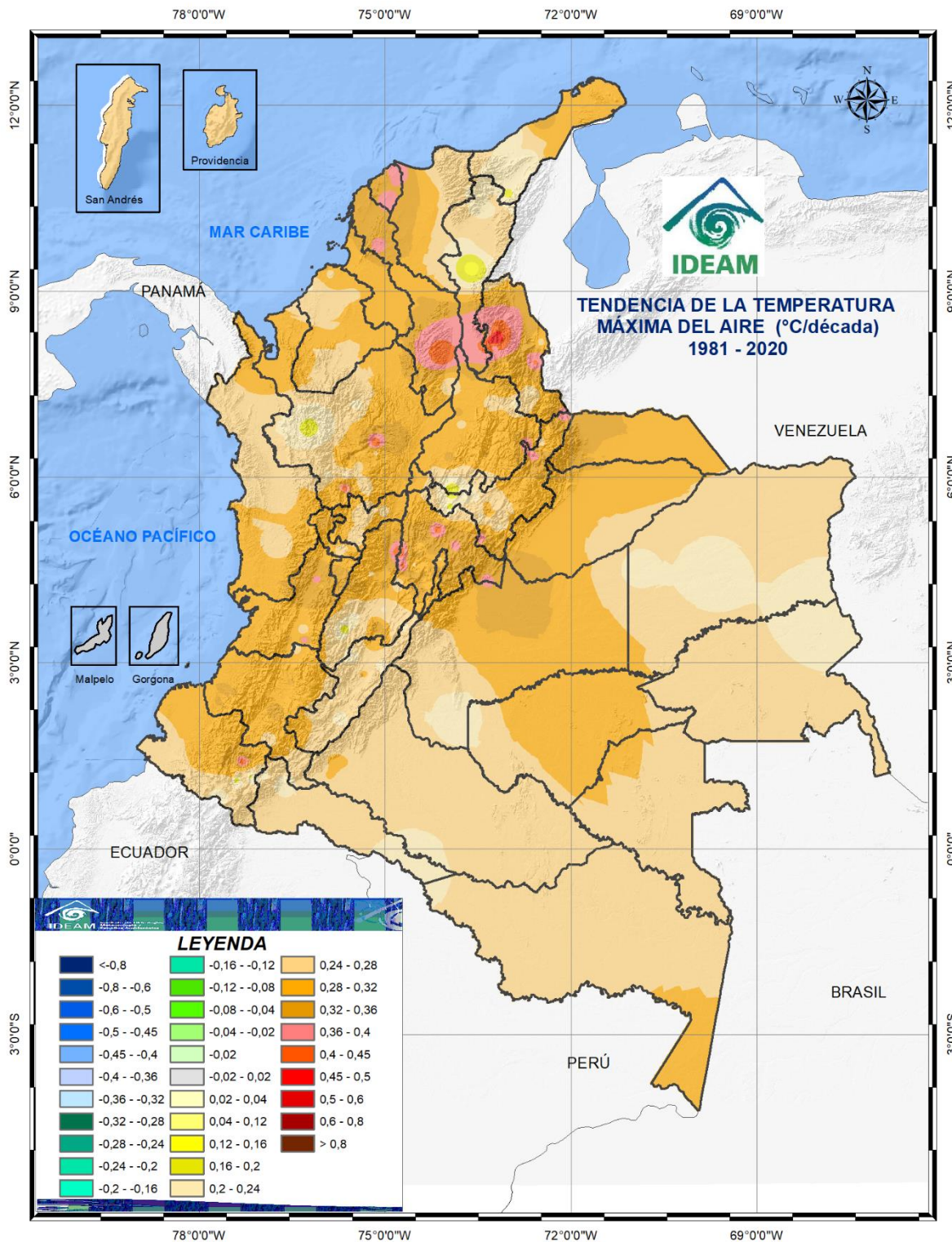


Figura 3. Tendencia de la temperatura máxima anual del aire (°C/década) para el periodo 1981-2020.

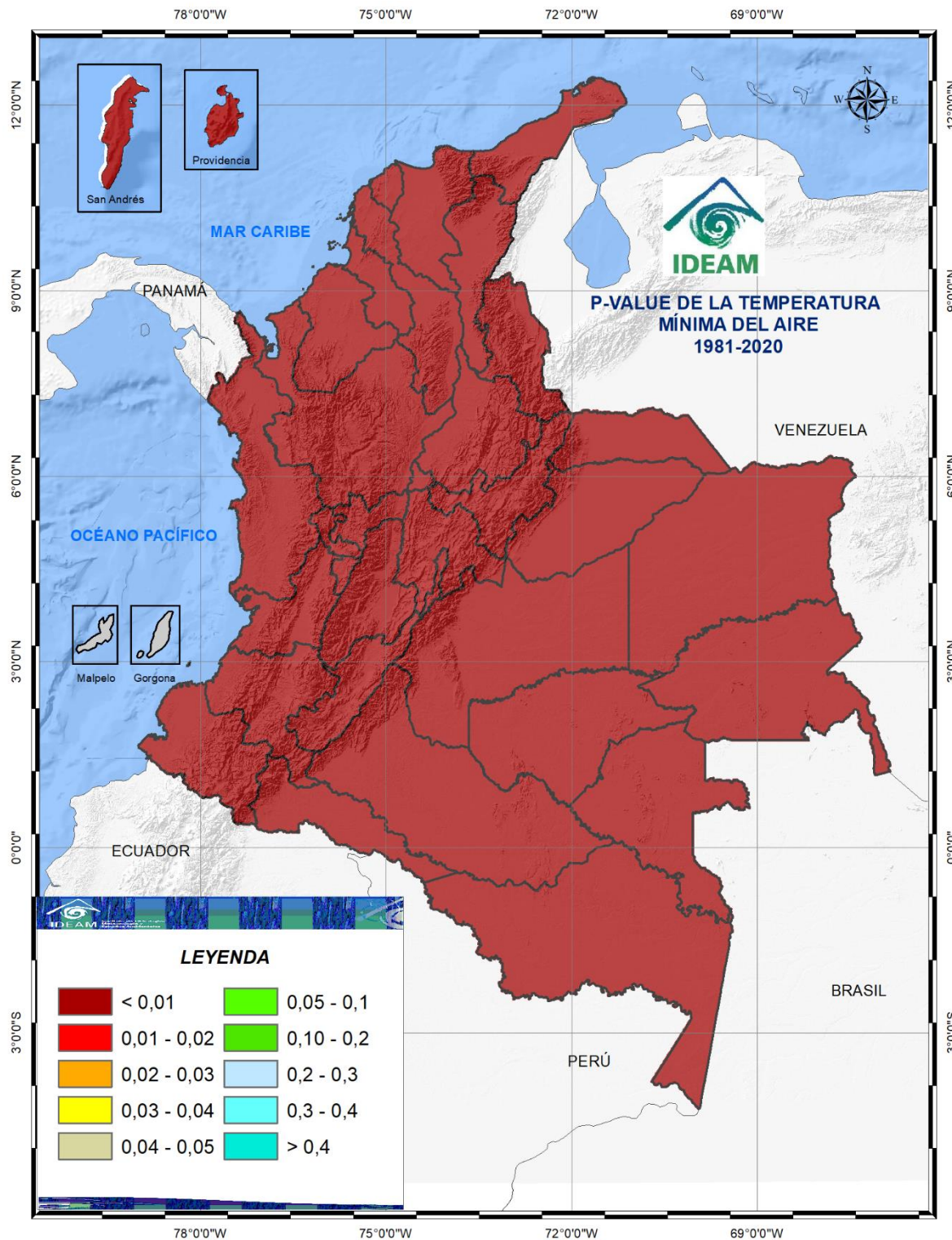


Figura 4. P-value de la temperatura mínima anual del aire para el periodo 1981-2020.

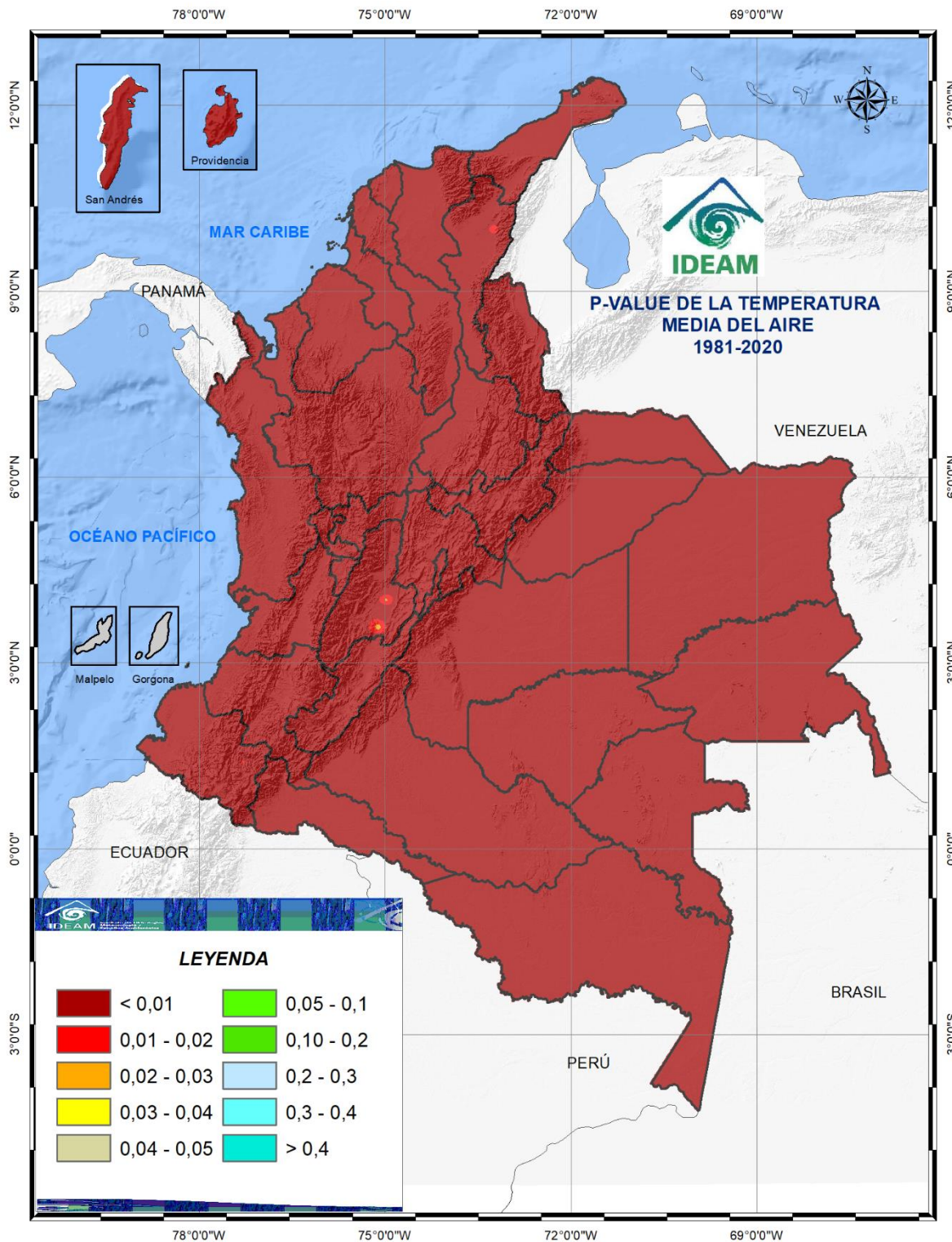


Figura 5. P-value de la temperatura media anual del aire para el periodo 1981-2020.

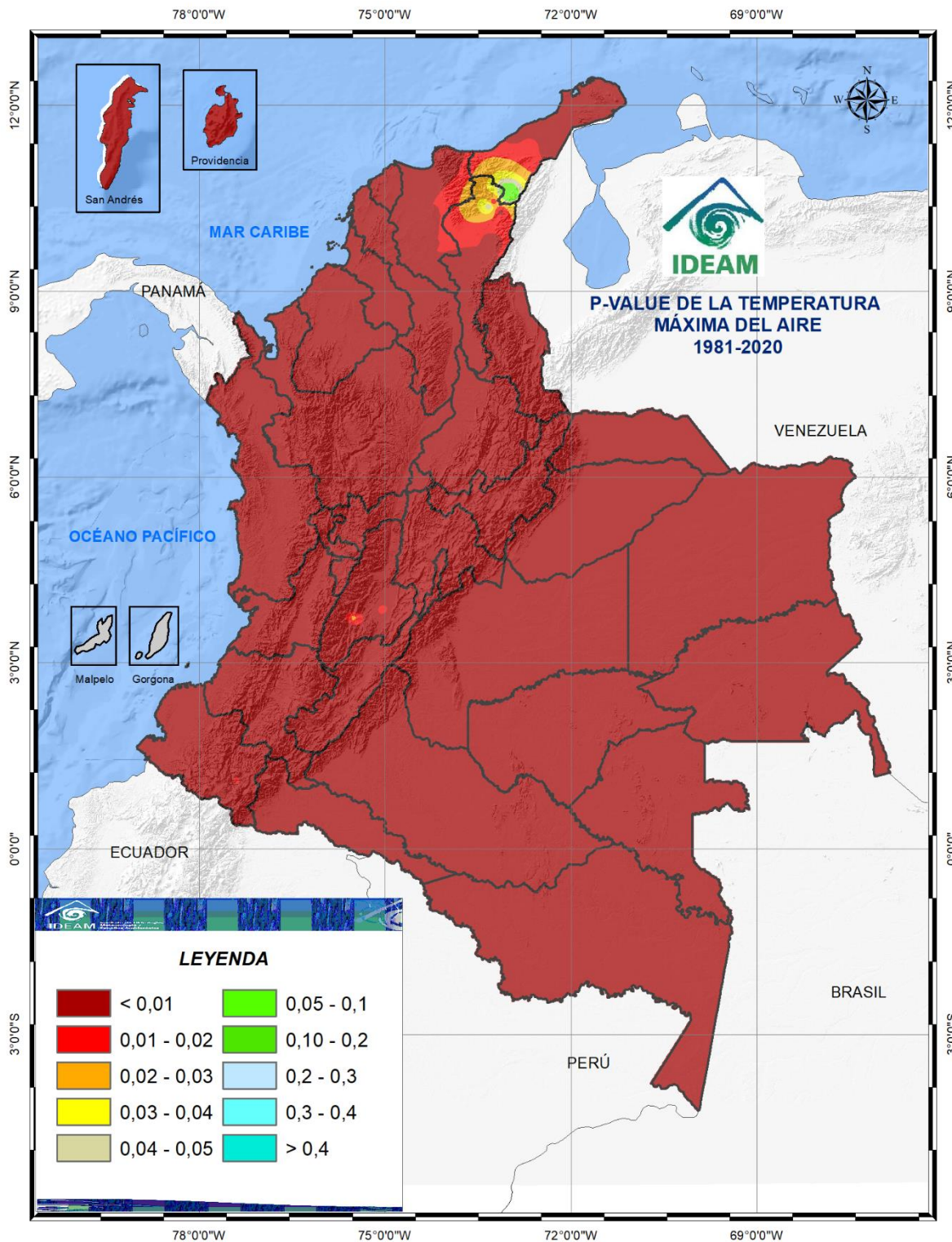


Figura 6. P-value de la temperatura máxima anual del aire para el periodo 1981-2020.

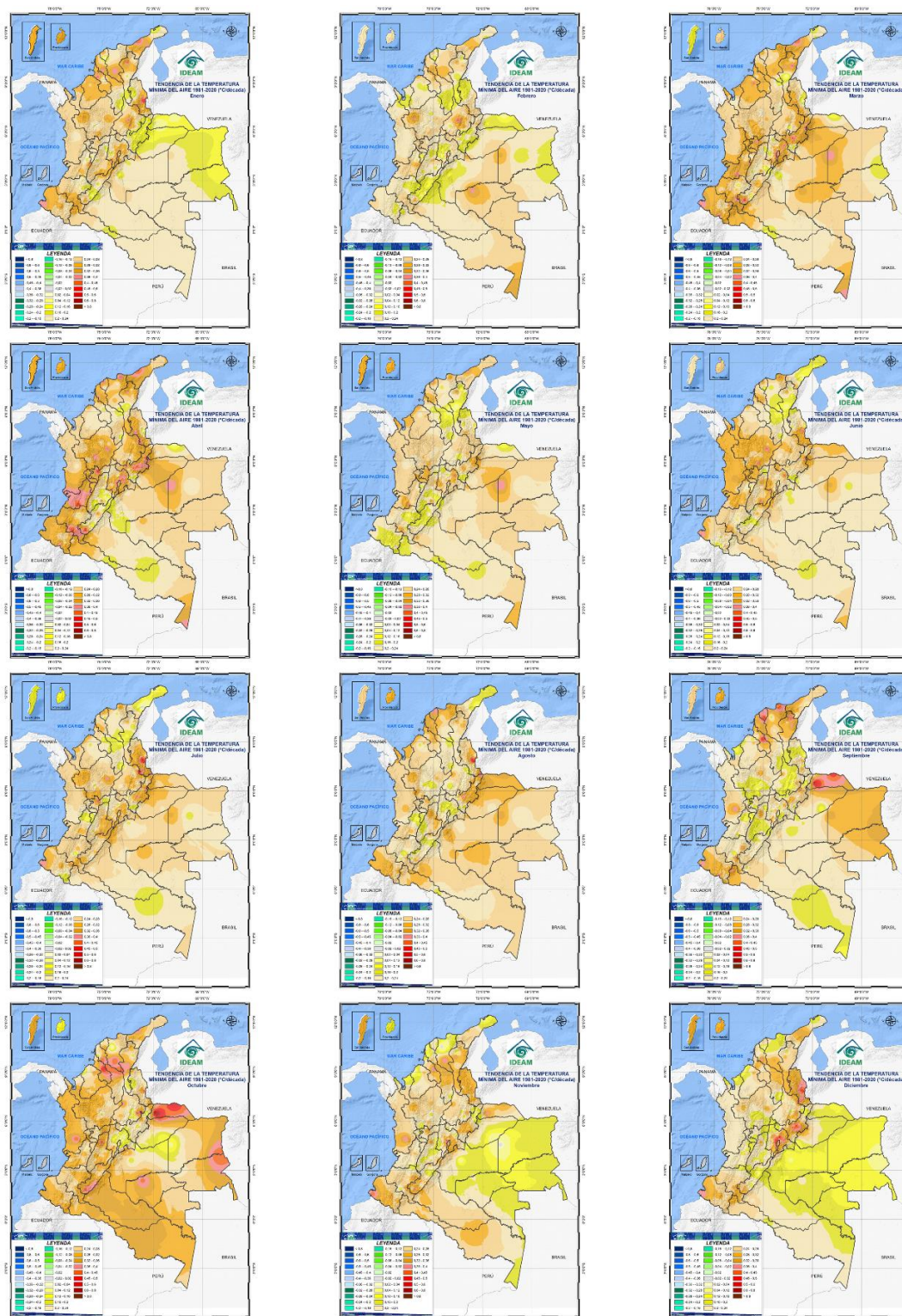


Figura 7. Tendencia de la temperatura mínima del aire en °C/década para el período 1981-2020 (ciclo estacional).

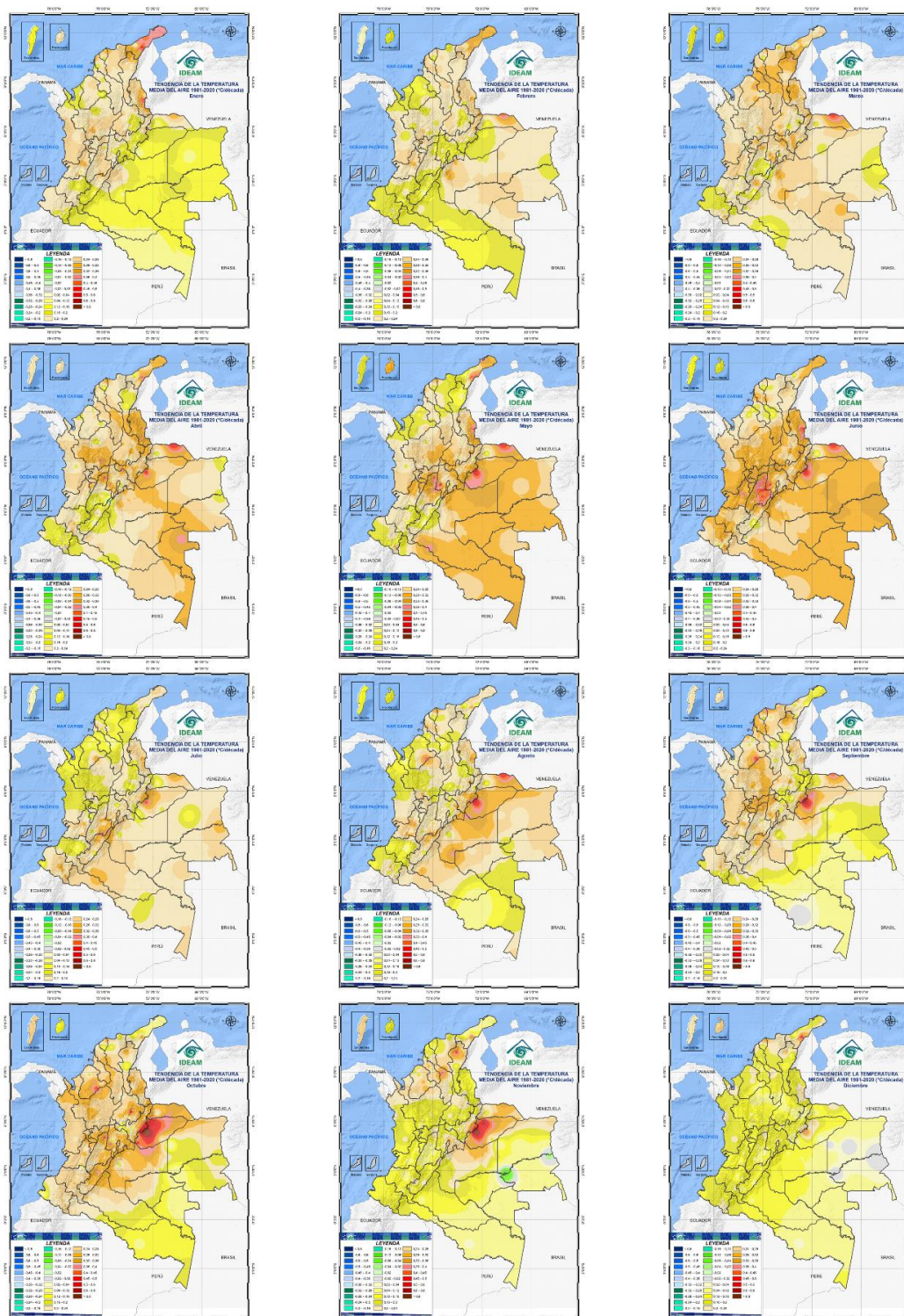


Figura 8. Tendencia de la temperatura media del aire en °C/década para el período 1981-2020 (ciclo estacional).

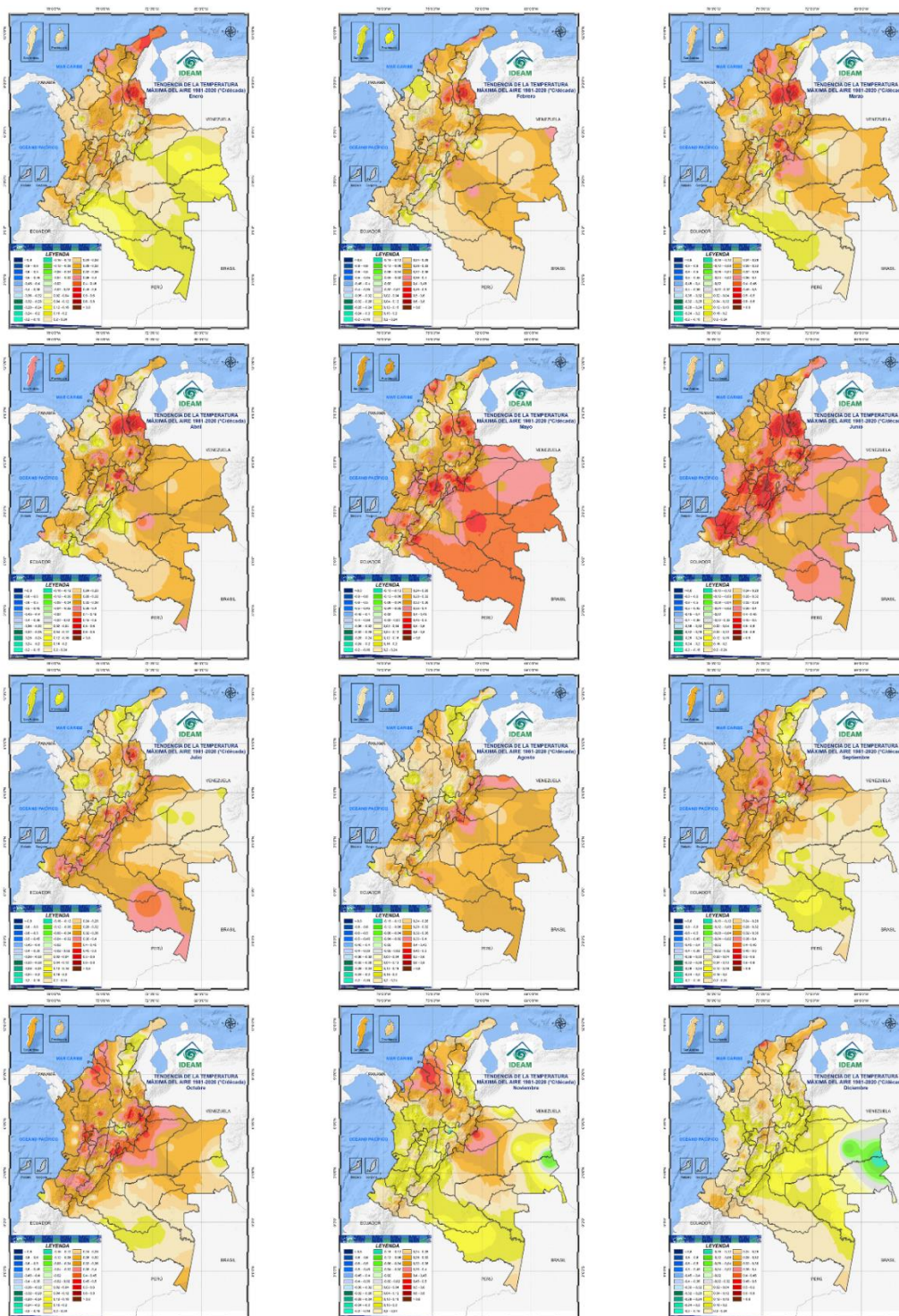


Figura9. Tendencia de la temperatura máxima del aire en °C/década para el período 1981-2020 (ciclo estacional).

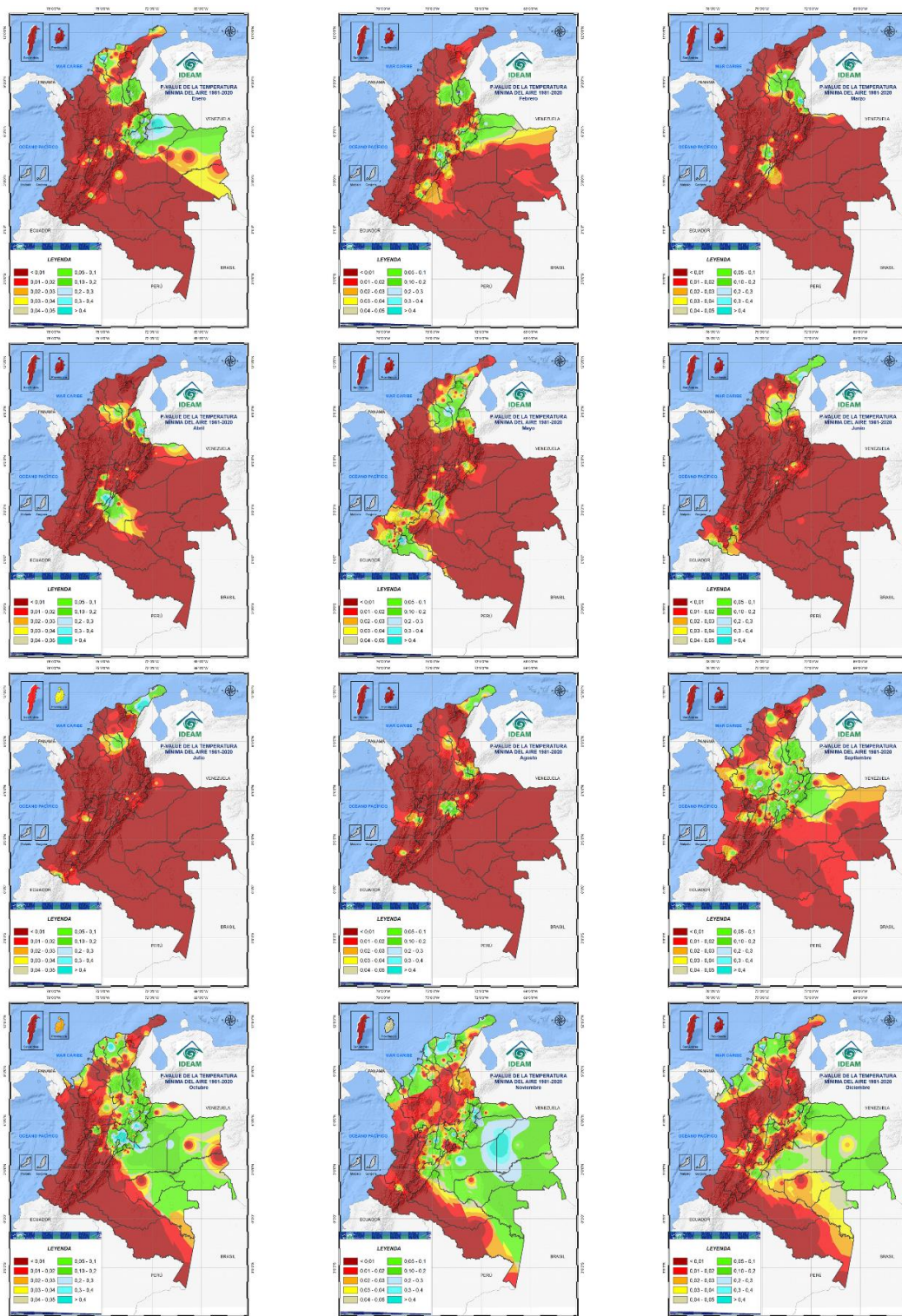


Figura 10. P-value de la temperatura mínima anual del aire para el periodo 1981-2020 (Ciclo estacional).

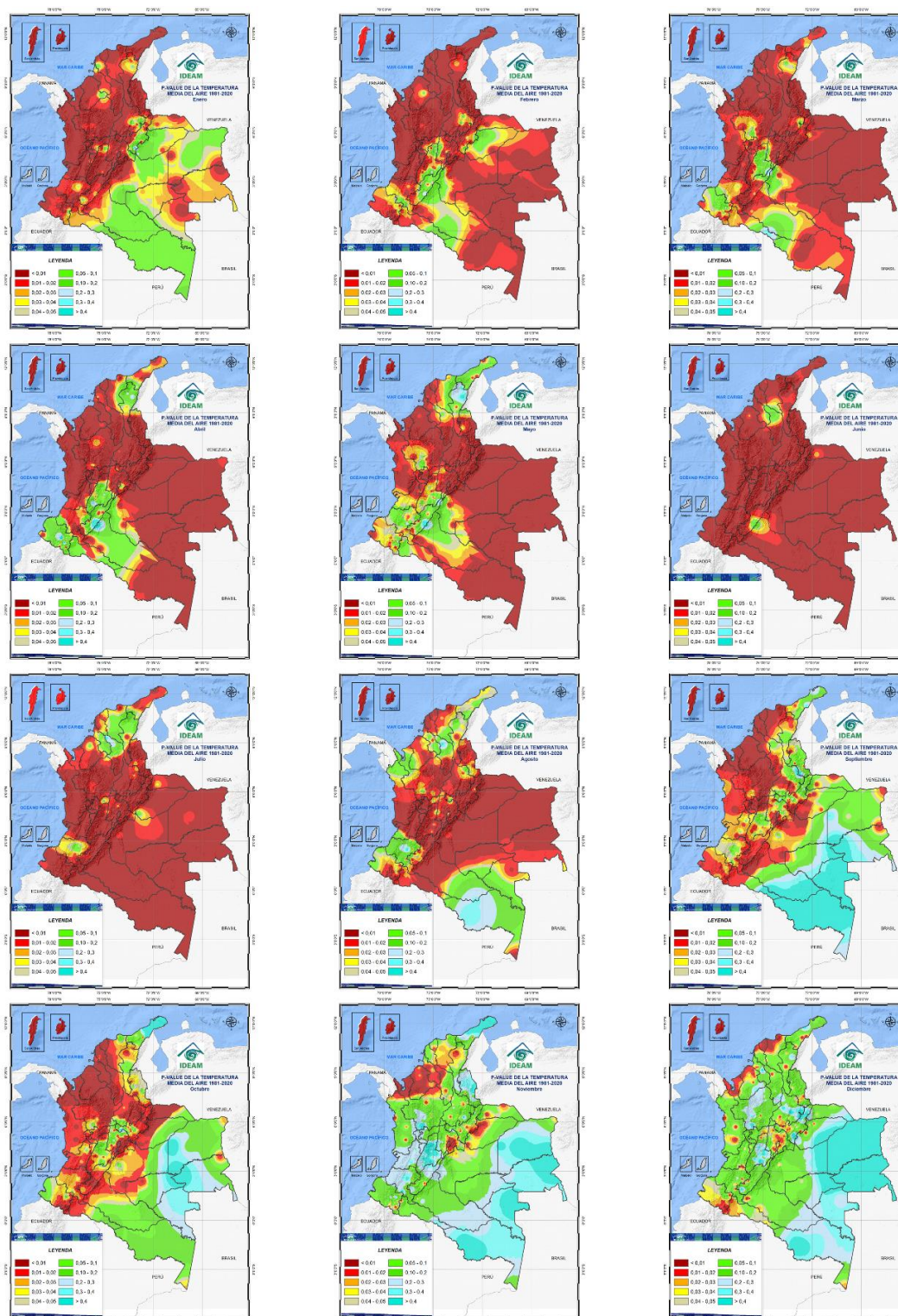


Figura 11. P-value de la temperatura media del aire para el periodo 1981-2020 (Ciclo estacional).

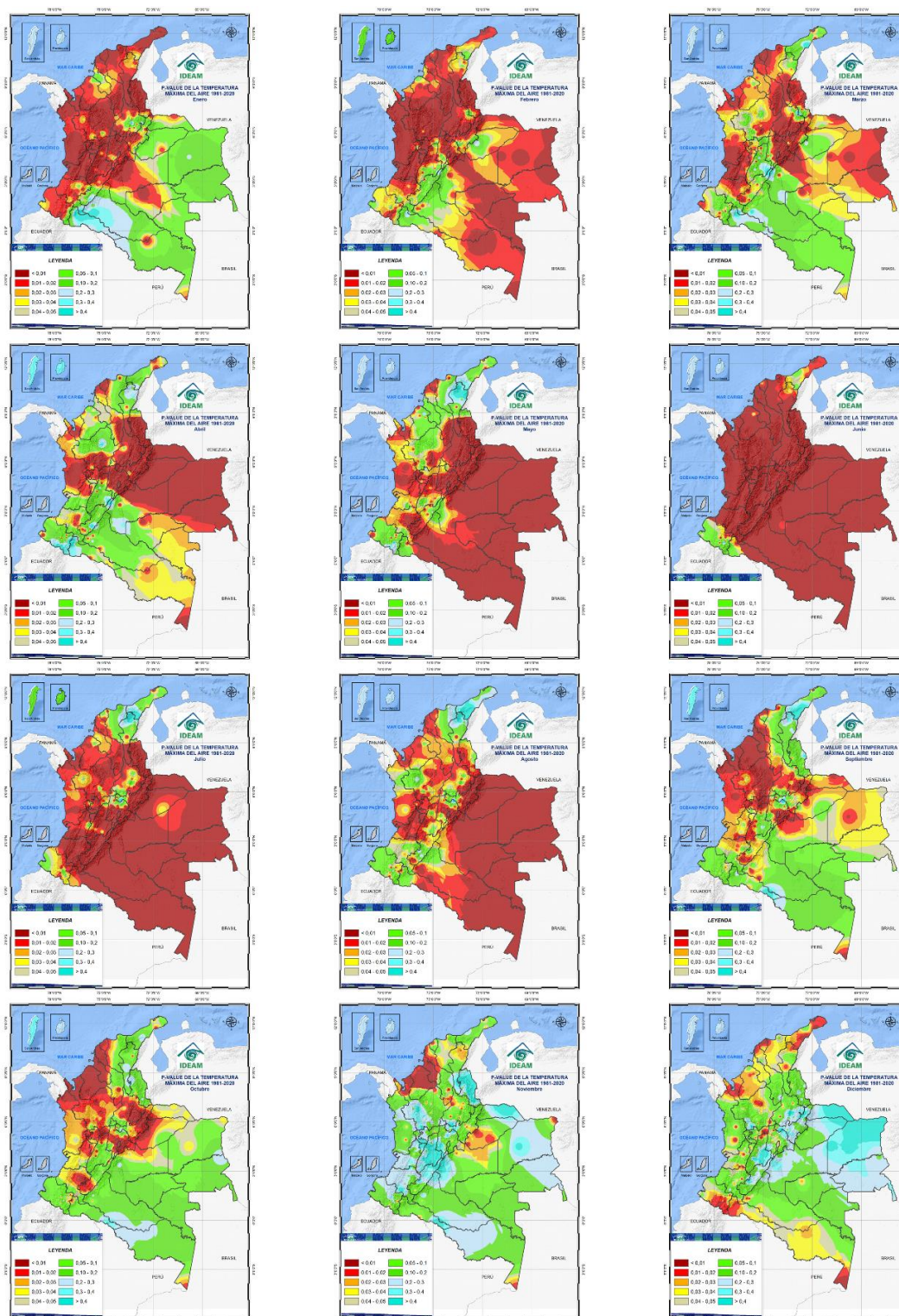


Figura 12. P-value de la temperatura máxima del aire para el periodo 1981-2020 (Ciclo estacional).

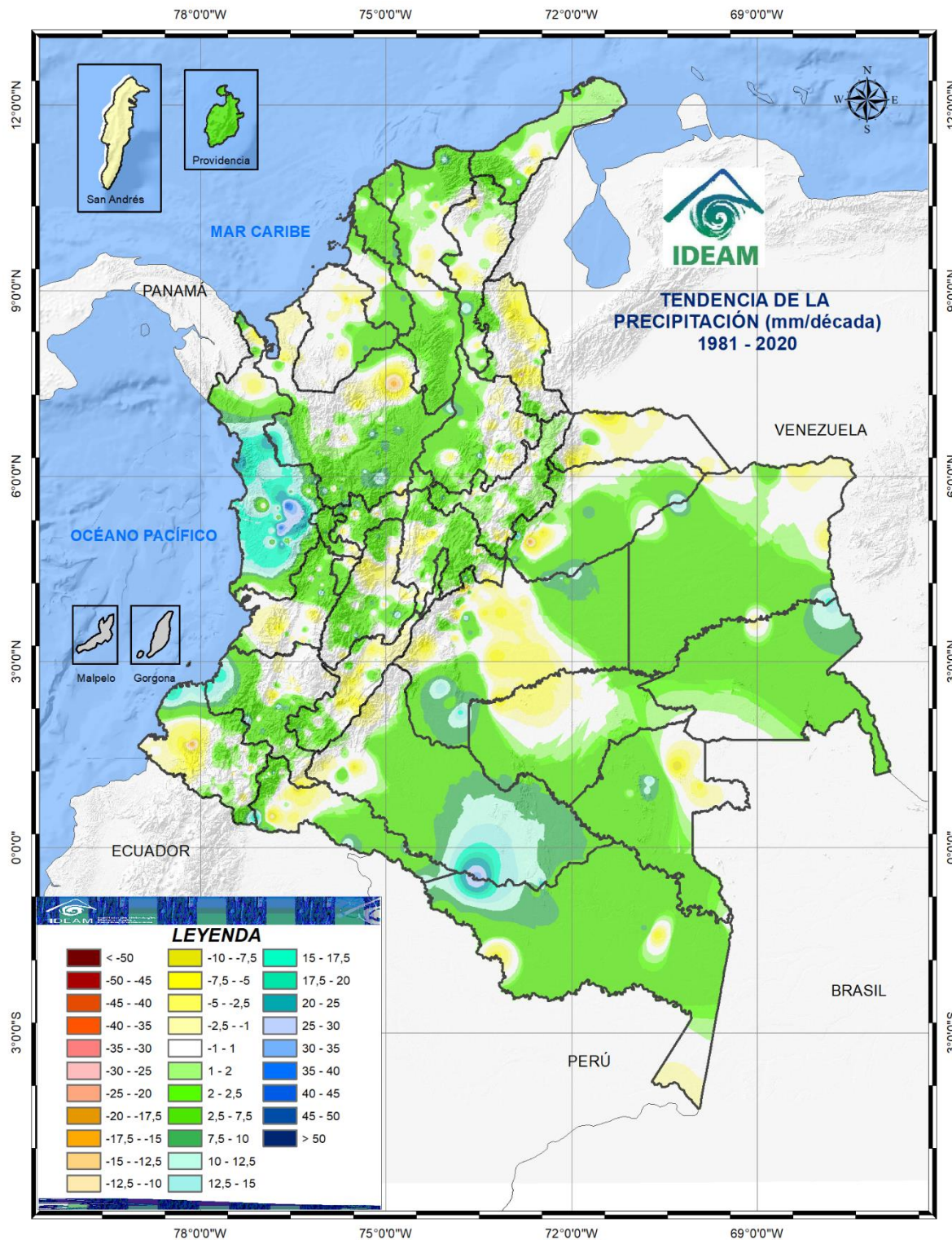


Figura 13. Tendencia de la precipitación anual (mm/década) para el periodo 1981-2020.

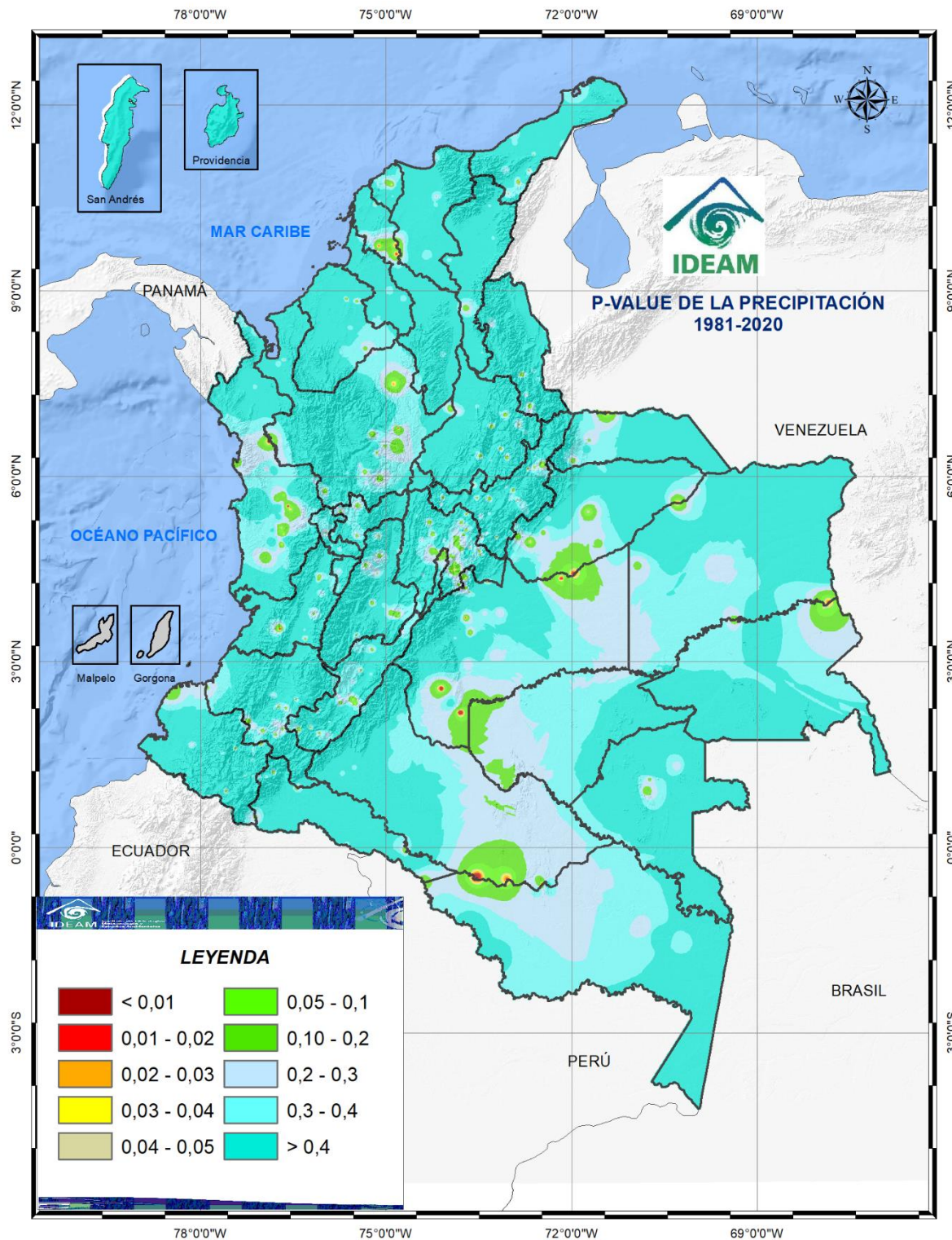


Figura 14. P-value de la precipitación anual para el periodo 1981-2020.

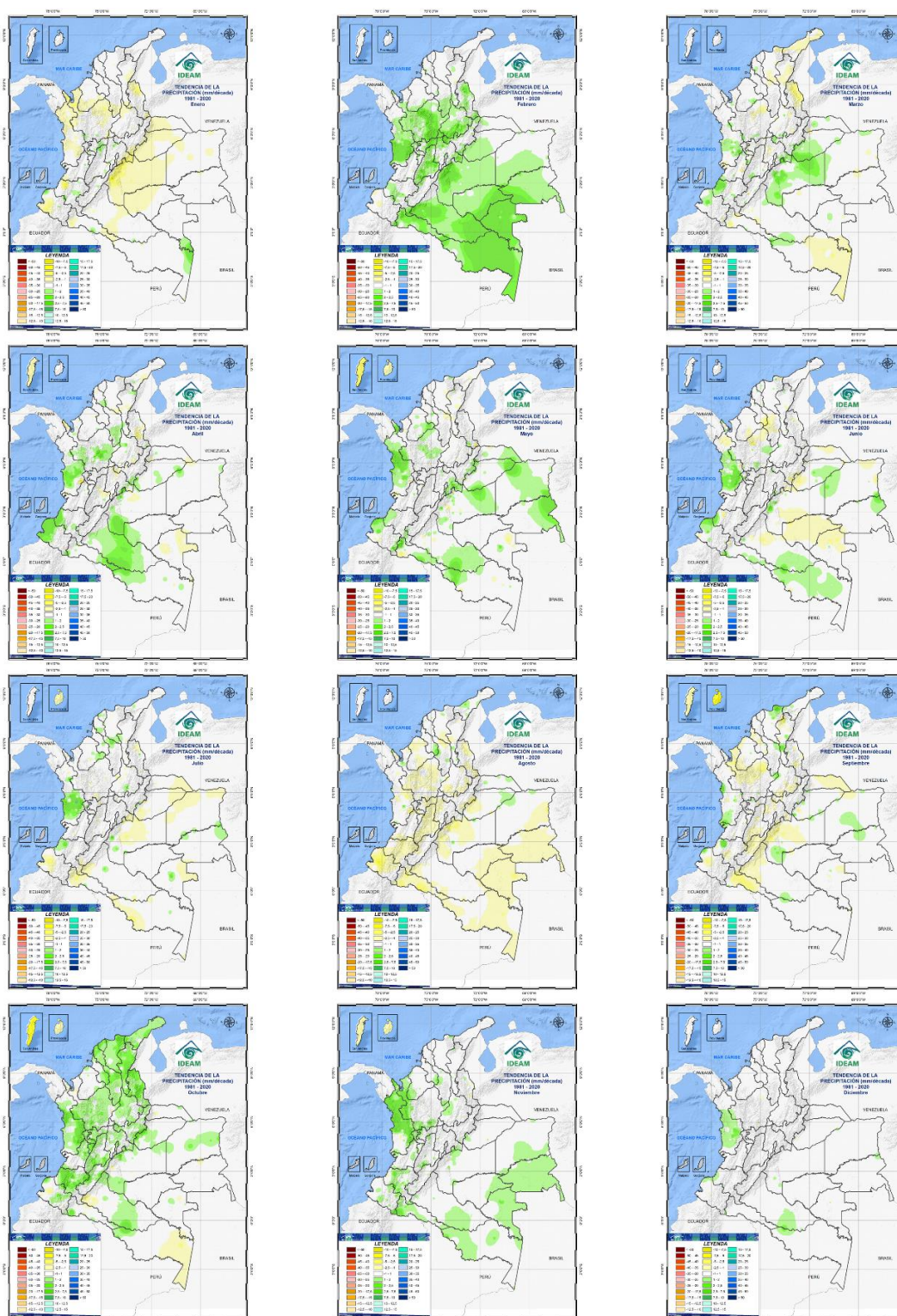


Figura 15. Tendencia de la precipitación mensual (mm/década) para el periodo 1981-2020.

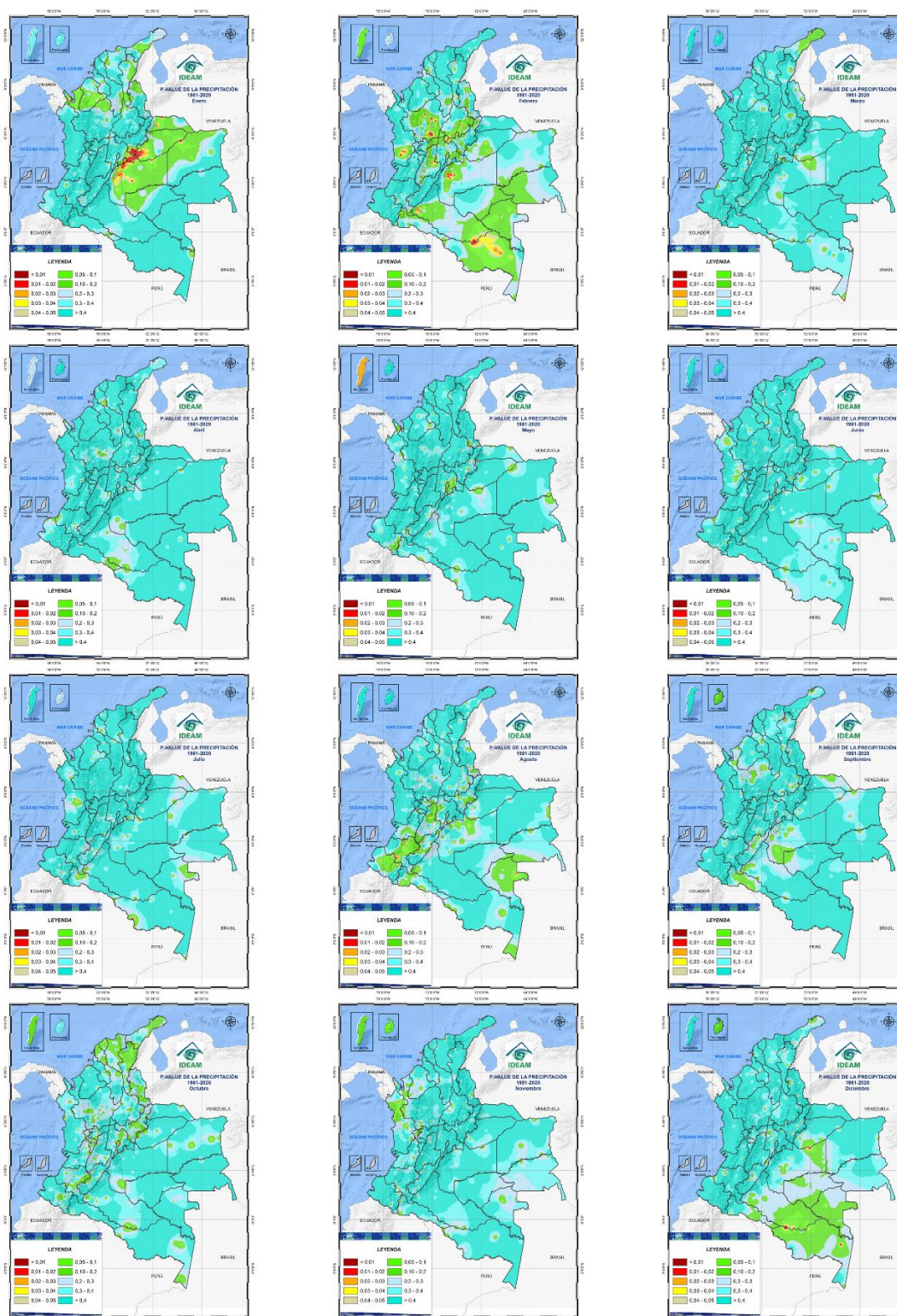


Figura 16. P-value de la precipitación mensual para el periodo 1981-2020.

Conclusiones

1. La temperatura anual media del aire en Colombia se ha incrementado a una tasa de $0.23^{\circ}\text{C}/\text{década}$; mientras que la temperatura mínima lo ha hecho a una razón de $0.29^{\circ}\text{C}/\text{década}$ y, la máxima a razón de $0.25^{\circ}\text{C}/\text{década}$ para el período 1981-2020.
2. En el caso de la temperatura media del aire, diciembre presenta la tasa de menor cambio a razón de $0.16^{\circ}\text{C}/\text{década}$; mientras que octubre tiene la tasa de cambio más alta del orden de $0.26^{\circ}\text{C}/\text{década}$.
3. Frente a la temperatura mínima, diciembre también presenta la tasa de menor de cambio a razón de $0.20^{\circ}\text{C}/\text{década}$; mientras que los meses de mayo y junio tienen las tasas de cambio más altas con un valor de $0.34^{\circ}\text{C}/\text{década}$.
4. Para la temperatura máxima, febrero presentó la tasa de menor cambio a razón de $0.23^{\circ}\text{C}/\text{década}$; mientras que abril presentó la tasa de cambio más alta a razón de $0.29^{\circ}\text{C}/\text{década}$.
5. La tendencia de aumento de la temperatura (mínima, media, máxima) anual en Colombia presenta un grado de confiabilidad del orden del 95% puesto que este cálculo resultó ser estadísticamente significativo (p-value menor a 0.05).
6. El escenario de extrapolación de tendencia de estos valores sugiere que la temperatura media podría estar evolucionando a escenarios de cambio climático “pesimistas” (SSP5-8.5) ya que se alcanzarían incrementos de 1.0, 1.5, 2.0 y 2.5°C hacia 2040, 2060, 2080 y 2100 respectivamente frente al clima actual; mientras que, el escenario SSP5-8.5 sugiere incrementos de 0.6°C , 1.0°C y 2.2°C para 2021-2040, 2040-2060 y 2080-2100 respectivamente.
7. Por otra parte, la tendencia anual de la precipitación en Colombia estuvo aumentando a una tasa promedio de 21.9 mm/década durante 1981-2020; sin embargo, diferente a la temperatura, presenta una variación espacial a lo largo y ancho del país; siendo el norte-centro de la región Pacífica y gran parte del oriente del país las zonas que han presentado las tasas más altas en el aumento anual de la precipitación; hay lugares incluso donde las tasas de aumento anual son superiores a 35 o 40 mm/década.
8. De acuerdo con el análisis, tendencias negativas anuales de precipitación se presentaron en algunos sectores de Norte de Santander, noreste de Antioquia, centro de Huila, oeste de Nariño, Oeste de Arauca, suroeste de Casanare, oeste de Meta, oeste de Putumayo y oriente de Vaupés. Los descensos se han dado a razón de entre 5 y $12.5\text{ mm}/\text{década}$.
9. En el resto del país la precipitación ha aumentado a razón de entre 1 y 10 mm/década.
10. Los resultados mensuales de la tendencia de la precipitación en Colombia indicaron que los meses de enero, julio, agosto y septiembre presentaron valores negativos con tasas de disminución de -4.96, -1.55, -8.06, $-7.80\text{ mm}/\text{década}$ respectivamente.
11. Desafortunadamente, hay que mencionar que estos valores no son estadísticamente significativos (p-value >0.4) y por ende su grado de confianza es bajo.

Referencias Bibliográficas

Aguilar E, Auer I, Brunet M, Peterson TC, Wieringa J (2003). *Guidelines on climate metadata and homogenization*. WCDMP-No. 53, WMO-TD No. 1186. World Meteorological Organization, Geneva Suiza.

Aguilar, E., et al. (2005). *Changes in precipitation and temperature extremes in Central America and northern South America 1961 – 2003*, J. Geophys. Res., 110, D23107, doi:10.1029/2005JD006119

Alexandersson H (1986). *A homogeneity test applied to precipitation data*. Jour. of Climatol., 6:661-675.

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>

Cucconi O (1968). *Un nuovo test non parametrico per il confronto tra due gruppi campionari*. *Giornale degli Economisti*, 27:225-248.

Guijarro JA (2023). *Guía de uso del paquete R climatol (versión 4)*.
<https://cran.r-project.org/web/packages/climatol/index.html>

Khaliq MN, Ouarda TBMJ (2007). *On the critical values of the standard normal homogeneity test (SNHT)*. Int. J. Climatol., 27:681687.

OMM (2020). *Directrices sobre homogeneización*. OMMNº 1245, 61 pp., Ginebra, Suiza, ISBN 978-92-63-31245-8.

Paulhus JLH, Kohler MA (1952). *Interpolation of missing precipitation records*. Month. Weath. Rev., 80:129-133.

Peterson TC, Easterling DR, Karl TR, Groisman P, Nicholls N, Plummer N, Torok S, Auer I, Böhm R, Gullett D, Vincent L, Heino R, Tuomenvirta H, Mestre O, Szentimrey T, Salinger J, Førland E, Hanssen-Bauer I, Alexandersson H, Jones P, Parker D (1998). *Homogeneity Adjustments of 'In Situ' Atmospheric Climate Data: A Review*. Int. J. Climatol., 18:1493-1518.

Ruiz J.F. & Melo, J.Y (2023). *Propuesta metodológica alternativa para generar escenarios de cambio climático en lo que resta del siglo XXI (Trayectorias socioeconómicas compartidas) usando CPT (Climate Predictability Tool); Temperatura media del aire para territorio continental colombiano*. IDEAM METEO/001-2023. Pp 46.

http://bart.ideam.gov.co/wrfideam/new_modelo/DOCUMENTOS/2023/Nota%20T%c3%a9cnica%20IDEAM-METEO%20001-2023.pdf

Sokal RR, Rohlf PJ (1969). *Introduction to Biostatistics*. 2nd edition, 363 pp, W.H. Freeman, New York.

Venema V, Mestre O, Aguilar E, Auer I, Guijarro JA, Domonkos P, Vertacnik G, Szentimrey T, Stepanek P, Zahradnicek P, Viarre J, Müller-Westermeier G, Lakatos M, Williams CN, Menne M, Lindau R, Rasol D, Rustemeier E, Kolokythas K, Marinova T, Andresen L, Acquafredda F, Fratianni S, Cheval S, Klancar M, Brunetti M, Gruber C, Prohom Duran M, Likso T, Esteban P and Brandsma T (2012). *Benchmarking homogenization algorithms for monthly data*. *Clim. Past*, 8:89-115.

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