

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE AGRONOMÍA

DEPARTAMENTO FORESTAL



Tendencias Mensuales de Índices de Temperatura Máxima en México

Por:

CECILIA PÉREZ JIMÉNEZ

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO FORESTAL

Saltillo, Coahuila, México

Junio, 2015

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE AGRONOMÍA

DEPARTAMENTO FORESTAL

Tendencias Mensuales de Índices de Temperatura Máxima en México

Por:

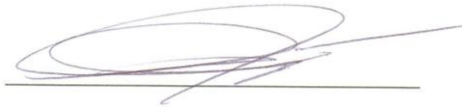
CECILIA PÉREZ JIMÉNEZ

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO FORESTAL

Aprobada



Dr. Jorge Méndez González

Asesor Principal



Dr. Mario Alberto García Aranda

Coasesor



Dr. Víctor Hugo Cambrón Sandoval

Coasesor



Dr. Leobardo Bañuelos Herrera
Coordinación
División de Agronomía
Coordinador de la División de Agronomía

Saltillo, Coahuila, México

Junio, 2015

ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS.....	ii
ÍNDICE DE TABLAS	iii
RESUMEN.....	iv
1 INTRODUCCIÓN	1
2 OBJETIVOS.....	3
2.1 General.....	3
2.2 Específicos.....	3
3 HIPÓTESIS	4
4 REVISIÓN DE LITERATURA.....	5
4.1 Variabilidad climática.....	5
4.2 Detección de cambio climático	6
4.3 Indicadores o índices climáticos.....	6
4.4 Datos instrumentales de México	8
4.5 Cambios en la temperatura de México.....	8
4.6 Cambios de temperatura en otras partes del mundo.....	10
5 MATERIALES Y MÉTODOS	12
5.1 Descripción del área de estudio	12
5.2 Datos climáticos	14
5.3 Procedimiento y análisis estadístico	15
6 RESULTADOS	20
6.1 Variaciones en índices climáticos de Temperatura máxima.....	20
6.1.1 Temperatura media	23
6.1.2 Temperatura máxima.....	23
6.1.3 Días con temperatura $\geq 30^{\circ}$ C	23
6.1.4 Desviación estándar de temperatura máxima	24
6.1.5 Temperatura media de días con temperatura $\geq 30^{\circ}$ C	24
6.1.6 Días con temperatura $\geq 35^{\circ}$ C	28
6.1.7 Temperatura mínima.....	28

6.1.8 Temperatura media de los días con temperatura \geq a 35°C	28
6.1.9 Días con temperatura \geq 40°C	29
6.1.10 Temperatura media de días con temperatura \geq 40°C	29
7 DISCUSIÓN	39
8 CONCLUSIONES	43
9 LITERATURA CITADA.....	44

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Área de estudio y distribución geográfica de las 580 estaciones climatológicas utilizadas en el presente estudio.....	15
Figura 2. Porcentaje de estaciones climatológicas que mostraron tendencias significativas ($p < 0.10$) en cada índice climático de temperatura máxima en México.....	21
Figura 3. Distribución porcentual de estaciones que mostraron tendencia significativas ($p < 0.10$) en los diferentes índices climáticos de temperatura máxima en México.....	22
Figura 4. Valores de la pendiente promedio mensual por cada índice climático de temperatura máxima en México.	25
Figura 5. Patrones geográficos de tendencias de temperatura media, de la máxima (T_m , °C.año ⁻¹) en México.	26
Figura 6. Patrones geográficos de tendencias de temperatura máxima, de la máxima (T_{max} , °C.año ⁻¹) en México.	27
Figura 7. Patrones geográficos de tendencias del número de días con temperatura ≥ 30 °C (NDT_{30} , °C.año ⁻¹) en México.....	31
Figura 8. Patrones geográficos de tendencias de la desviación estándar de temperatura máxima (DE , °C.año ⁻¹) en México.....	32
Figura 9. Patrones geográficos de tendencias de temperatura media de días mayor a 30°C (NDT_{30} , °C.año ⁻¹) en México.....	33
Figura 10. Patrones geográficos de tendencias del número de días con temperatura ≥ 35 °C (NDT_{35} , °C.año ⁻¹) en México.	34
Figura 11. Patrones geográficos de tendencias de temperatura mínima, de las máximas (T_{min} ; °C.año ⁻¹) en México.	35
Figura 12. Patrones geográficos de tendencias de temperatura media de días con temperatura ≥ 35 °C, (T_{m35} , °C.año ⁻¹) en México.....	36

Figura 13. Patrones geográficos de tendencias del número de días con temperatura ≥ 40 °C (NDT_{40} , °C.año ⁻¹) en México.	37
Figura 14. Patrones geográficos de tendencias de temperatura media de días con temperatura ≥ 40 °C (Tm_{40} , °C.año ⁻¹) en México.....	38

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Variables o índices climáticos derivados de temperatura máxima, analizados en la presente investigación.....	16
---	----

La presente tesis es parte del proyecto de investigación financiado por el Fondo Sectorial CONAFOR-CONACyT, denominado “Variabilidad climática e interacción con otros factores que afectan la dinámica poblacional de descortezadores en bosques amenazados de México”, registro CONAFOR-2014, C01-234547”, cuyas instituciones responsables son la Universidad Autónoma de Querétaro y la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro.

RESUMEN

La evaluación de los impactos del cambio climático requiere de estimaciones actualizadas de las tendencias de temperatura extrema (máxima). El presente estudio tiene como objetivo evaluar la variabilidad espacial y temporal de temperatura máxima en México para generar conocimiento de cambios en las tendencias pasadas y futuras en el país. Una colección de datos instrumentales de temperaturas diarias, en 580 estaciones climatológicas distribuidas en todo el país, fue utilizada para el cálculo de tendencias de índices de la temperatura máxima. La tendencia de cada índice se estimó mediante un análisis estadístico no paramétrico (Mann-Kendall) en un periodo de 1940 – 2010, la variabilidad espacial se puso de manifiesto a través de mapas de patrones geográficos de tendencias. Los resultados mostraron la predominancia de tendencias positivas (65.38 %) sobre las negativas (35.38 %). Los índices de temperatura máxima, demostraron que la temperatura y eventos cálidos en México están incrementando en todos los meses del año, los índices con mayores cambios fueron temperatura media (T_m), temperatura máxima (T_{max}) y días con temperatura $\geq 30^\circ\text{C}$ (NDT_{30}) y sus respectivas magnitudes de incremento fluctúan entre $0.069\text{ }^\circ\text{C.año}^{-1}$, $0.053\text{ }^\circ\text{C.año}^{-1}$ y $0.151\text{ días.año}^{-1}$ respectivamente.

Palabras claves: variabilidad climática, temperatura máxima, Mann-Kendall, índices climatológicos.

Correo Electrónico; Cecilia Pérez Jiménez, cecipjim@gmail.com

1 INTRODUCCIÓN

El cambio climático y el calentamiento global son dos conceptos que actualmente aparecen en cientos de investigaciones científicas. Esto debido a la necesidad que existe de generar conocimiento científico que explique la razón de por qué, ahora los fenómenos naturales suelen ser más intensos, también se está tomando sentido o está de moda la concientización sobre la conservación y cuidado del medio ambiente y los recursos naturales. Mucho se ha dicho o pronosticado acerca de las consecuencias catastróficas que el calentamiento de la tierra puede generar. Sin embargo, en México, los fenómenos naturales más costosos después de los sismos; y los más comunes, son los hidrometeorológicos; dentro de estos se considera la sequía, ola de calor, incendios forestales, ondas frías, helada, lluvia e inundación (CENAPRED, 2001, 2011).

Los cambios en la frecuencia de eventos meteorológicos extremos han empezado a ser demostrados en la literatura científica por algunos investigadores, incluyendo un panorama de éstos para el planeta (Alexander *et al.*, 2006; Trenberth *et al.*, 2007; IPCC, 2007) y para diversas regiones incluyendo Norteamérica (Peterson *et al.*, 2008) y Centroamérica (Aguilar *et al.*, 2005). La evidencia del cambio climático reciente ha sido documentada en varios componentes del sistema climático, tales como la atmósfera, el océano, los continentes y la cubierta de hielo y nieve (IPCC, 2007).

Una de las evidencias más claras ha sido documentada a partir de datos instrumentales del clima, específicamente de las observaciones de temperatura (Brohan *et al.*, 2006; Vázquez, 2010). Por ejemplo, Easterling *et al.* (1997) afirman

que aumentos de temperatura de $0.10\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{a}\ddot{\text{a}}\text{o}^{-1}$ están sucediendo en América del Sur, Nueva Zelanda, Australia, algunas islas del Pacifico e Indonesia. Cane *et al.* (1997) coinciden con Easterling *et al.* (1997) que la temperatura media global está incrementando $0.5^{\circ}\text{C}\cdot\text{siglo}^{-1}$. Otros investigadores como Shrestha *et al.* (1999) en Nepal, Santana *et al.* (2009) en Chile, Oyler *et al.* (2015) en Estados Unidos, Xia *et al.* (2015) y Zhang *et al.* (2014) en China, han utilizado bases de datos diarios de temperatura y aseguran haber encontrado cambios en las tendencias de temperatura, especialmente con tendencias a incrementar.

Un análisis preliminar de los datos instrumentales de temperatura de la República Mexicana permite documentar un claro aumento de la temperatura promedio del país en los años recientes, el cual es consistente con el calentamiento global (Vázquez, 2010). Esta evidencia basada en los promedios de temperatura calculados por el Servicio Meteorológico Nacional a partir de observaciones instrumentales muestra que el clima mexicano se encuentra inmerso de manera consistente en los procesos de cambio climático identificados por la comunidad cientifca mundial y al mismo tiempo, nos plantea el reto de incrementar nuestro entendimiento detallado sobre los cambios del clima en escalas más pequeñas (regiones, entidades federativas, localidades), ya que en éstas tienen lugar la mayor parte de las decisiones que impactan directamente la dinámica socioeconómica del país (Vázquez, 2010).

El presente trabajo tiene como objetivo generar información de tendencias de temperatura, para aportar conocimiento acerca del comportamiento temporal y espacial que se registra en México

2 OBJETIVOS

2.1 General

- Evaluar la variabilidad espacial y temporal de temperatura máxima en México para generar conocimiento de cambios en las tendencias pasadas y futuras en el México.

2.2 Específicos

- Aplicar la prueba no paramétrica Mann Kendall a datos instrumentales (10 índices climáticos) de temperatura máxima para conocer las tendencias (incremento/decremento) en la república Mexicana.
- Generar patrones de distribución geográfica para cada índice climático, para identificar regiones con tendencias crecientes/decrecientes de temperatura máxima en México.
- Contribuir a la generación de conocimiento que sea de utilidad para caracterizar el clima y detectar cambios de índices de temperatura máxima en México.

3 HIPÓTESIS

H_0 = No hay tendencias significativas de los índices de temperatura en México.

H_a = Existen tendencias significativas de los índices de temperatura en México.

4 REVISIÓN DE LITERATURA

4.1 Variabilidad climática

En la comunidad científica existe una creciente preocupación acerca de la alta probabilidad que el clima, tanto en su comportamiento medio como extremo, este cambiando como resultado del forzamiento antrópico asociado al incremento de gases efecto invernadero (GEI). La variabilidad natural del clima enmascara la huella de la influencia humana y complica la detección y atribución de causas del cambio climático (Brunet, 2010).

Para el IPCC, el término “cambio climático” es una modificación en el estado del clima identificable (por ejemplo, mediante análisis estadístico) a raíz de un cambio en el valor medio y/o en la variabilidad de sus propiedades y que persiste durante un periodo prolongado, por lo general cifrado en decenios o en lapsos más largos (Magaña y Galván, 2010). Dicho de otra manera, el cambio climático se define como un cambio estable y durable en periodos de tiempo que van desde décadas hasta millones de años, las causas pueden ser naturales, como por ejemplo, variaciones en la energía que se recibe del sol, erupciones volcánicas, circulación oceánica, procesos biológicos entre otros o puede ser causado por influencia antrópica (actividades humanas), como por ejemplo, emisiones de CO₂ y otros gases que atrapan calor (IPCC, 2007). En este contexto el calentamiento global es una consecuencia de la influencia antrópica y se refiere al aumento gradual y continuo que se proyecta a futuro de la temperatura de la atmosfera y océanos de la Tierra.

4.2 Detección de cambio climático

Hoy en día el trabajo de grupos como el IPCC incluyen, dos líneas de análisis que intentan poner en claro, primero: que el clima está cambiando respecto a lo conocido en el pasado reciente, y segundo: que las causas de tales cambios tienen un origen asociado con la actividad humana y, por lo tanto, no se trata de un proceso natural. En el primer caso hablamos de lo que se conoce como detección de señales de cambio climático; en el segundo, de atribución (Magaña y Galván, 2010), por lo tanto, la detección de cambio climático es el proceso de demostrar que una modificación observada es significativamente importante (desde el punto de vista estadístico) respecto a que se considera parte de la variabilidad natural del clima.

Este estudio se enfoca principalmente en la detección de señales de cambio del indicador o índice climático de temperatura máxima en México; la detección nos permiten establecer si un cambio observado es o no muy raro desde el punto de vista estadístico, pero ello no significa, necesariamente comprender sus causas.

4.3 Indicadores o índices climáticos

Un indicador es una medida, generalmente cuantitativa, que se utiliza para ilustrar y comunicar de manera sencilla un proceso complejo que incluye tendencias y progresión a lo largo del tiempo. Para que un indicador sea válido debe cumplir dos condiciones: tener una buena base conceptual (debe hacerse una descripción de la metodología y de las fórmulas utilizadas) y ser comprensible y simple Cunillera (28 de marzo de 2015).

La Organización Meteorológica Mundial (OMM) establece que el cálculo de índices climáticos es una herramienta útil para caracterizar el clima, presentar los patrones climáticos y detectar cambios.

Hablar de detección del cambio climático implica demostrar, generalmente en términos estadísticos, que el clima ha cambiado con algún nivel de significancia en un intervalo de tiempo determinado (Brunet *et al.*, 2001, IDAG, 2005; IPCC, 2007).

Basada en la metodología propuesta por el Grupo de Expertos en Detección de Cambio Climático e Índices (ETCCDI) por sus siglas en inglés, esta investigación se enfoca en el estudio de temperatura máxima extrema (TXx), a la vez se hace una adaptación de otros indicadores para el análisis de eventos extremos de temperatura en México.

Uno de los requerimientos para trabajar detección de cambio climático a escala regional o local es tener datos de calidad. El ETCCDI, del Programa de Variabilidad y Predicción del Clima (CLIVAR) de la Organización Meteorológica Mundial tiene la tarea de solventar las necesidades en la medición y caracterización objetivas del clima mediante apoyo para la coordinación internacional, fomentando la comparación entre datos modelados y observaciones. Lo anterior, incluye los aspectos prácticos del desarrollo de materiales y guías para los servicios meteorológicos nacionales con el fin de guiar el cálculo y uso de los índices de detección de cambio climático y la homogeneización de datos climáticos, el mejoramiento de la cobertura global y la evaluación de los índices (Magaña y Galván, 2010).

El uso sistemático de índices climáticos ha permitido mejorar el diagnóstico global de los cambios en extremos de temperatura y precipitación, contribuyendo al reporte de evaluación del IPCC. En la región de Norteamérica (Canadá, EE.UU. y norte de México) se ha encontrado evidencia de cambios consistentes con el aumento de la temperatura del planeta: incremento en la lluvia intensa, aumento en los eventos de temperaturas altas y disminución de eventos de temperaturas bajas (Peterson *et al.*, 2008).

4.4 Datos instrumentales de México

En México las observaciones instrumentales del clima se encuentran disponibles en varias bases de datos, aunque en la mayoría de ellas aún se requiere implementar un estricto proceso de control de calidad. El Servicio Meteorológico Nacional (SMN) tiene la misión de administrar la base de datos nacional oficial del clima en México y es de carácter público. Específicamente, los datos de la red de estaciones climatológicas convencionales administrados en el sistema CLIMA COMputarizado (CLICOM) son la fuente de información climática con las dos características requeridas para el estudio del clima en la escala de las entidades federativas: un periodo de registro largo (por lo menos cuatro o cinco décadas continuas) y cobertura geográfica suficientemente densa (Vázquez, 2010).

4.5 Cambios en la temperatura de México

Existen algunos casos que muestran las modificaciones en el clima de México, coherentes con las variaciones de baja frecuencia en el clima global. El calentamiento tiene, en nuestro país, una señal definida, sobre todo hacia la

región noroeste. Usando datos de algunas estaciones climáticas de México, Magaña y Galván, (2010) han identificado cambios en la actividad de ondas de calor, de tormentas intensas o de periodos secos en diversas partes, como Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, donde se observa que los episodios de ondas cálidas son cada vez más frecuentes, mientras que los sucesos fríos han disminuido en un lapso de alrededor de 50 años.

Vázquez, (2010) menciona en un análisis preliminar de datos instrumentales de temperatura de la República Mexicana la evidencia de anomalías en un periodo base de 1971 - 2000 y señala que el clima mexicano se encuentra inmerso de manera consistente en los procesos de cambio climático identificados por la comunidad científica mundial, al mismo tiempo, plantea el reto de incrementar nuestro entendimiento detallado sobre los cambios del clima en escalas más pequeñas (regiones, entidades federativas, localidades), ya que en éstas tienen lugar la mayor parte de las decisiones que impactan directamente la dinámica socioeconómica del país.

Es muy probable que el clima en México sea entre 2 y 4 °C más cálido para el periodo 2020 - 2080, principalmente en la parte más continental del norte de México, la temperatura de la superficie del mar podría aumentar entre 1 y 2 °C en el Caribe, Golfo y Pacífico mexicano; se incrementa la probabilidad de que los ciclones tropicales sean de categorías mayores en escala de Saffir-Simpson Martínez (2015).

En una evaluación de escenarios regionales de clima actual y de cambio climático futuro para México Estrada (2015) menciona que la temperatura podría aumentar

de 3 a 4 °C en el noroeste, reduciéndose ligeramente hacia el sur-sureste, donde el incremento sería de más de 2 °C. Sobre este mismo contexto, evaluando las consecuencias de cambio climático sobre la vegetación, se tiene que el 50 % de la vegetación del país tendría modificaciones, siendo los ecosistemas forestales los más afectados (Villers, 1999).

4.6 Cambios de temperatura en otras partes del mundo

Varios investigadores han llevado a cabo cientos de estudios relacionados al tema, Jaswal *et al.* (2015) mencionan que uno de los principales impactos del calentamiento global sobre la superficie de la tierra es el aumento de la frecuencia e intensidad de los fenómenos meteorológicos extremos.

Fioravanti *et al.* (2015) están convencidos que la evaluación de los impactos del cambio climático requiere estimaciones actualizadas de las tendencias de las temperaturas extremas, así pues estudiando las variaciones de la frecuencia e intensidad de temperaturas extremas sobre Italia, para conjunto de índices recomendados por el (ETCCDI), evaluando su tendencia mediante un análisis estadístico no paramétrico, se muestran tendencias significativas para los días de verano, las noches tropicales, olas de calor en la mayoría de las estaciones, con tendencias de calentamiento más pronunciadas en verano y primavera y las más débiles en invierno y otoño.

En la India Jhajharia *et al.* (2014) utilizando la prueba de Mann-Kendall para investigar las tendencias de la temperatura máxima, la temperatura mínima y media, demuestran que el 60 % de las estaciones analizadas exhibió tendencias

crecientes de temperatura máxima. En China, Ren y Zhou (2014) estudiaron las tendencias de índices de temperatura en la ciudad, encontrando que éstas mostraron cambios estadísticamente significativos para temperatura mínima, máxima y media obteniendo un incremento de 0.07, 0.023 y 0.047 °C.decada⁻¹.

Recientemente, Llorante (2012) en España estudió la distribución espacial de las tendencias mensuales de temperatura media, máxima, y mínima durante un periodo de 1981-2010, determinando la magnitud de las tendencias mediante el método de estimador de Sen, y la prueba de Mann-Kendall para determinar significancia estadística, resultando en que los incrementos obtenidos fluctuaron en 0.03 - 0.04°C.año⁻¹.

En Sicilia, Italia, Viola *et al.* (2014) atribuyen que los efectos de la variabilidad del clima influyen directamente en la disponibilidad de agua y en los regímenes de temperatura y precipitación, de ahí el interés de verificar la hipótesis de aumentos en la temperatura. La aplicación de la prueba estadística no paramétrica de Mann-Kendall les proporcionó evidencia de un aumento en la aridez en la parte central y occidente de la isla.

5 MATERIALES Y MÉTODOS

5.1 Descripción del área de estudio

El presente trabajo comprende geográficamente a México, el cual está localizado en América del Norte, entre los meridianos 118° 22' 00" y 86° 42' 36" de longitud oeste y entre los paralelos 32° 43' 06" y 14° 32' 27" de latitud norte.

Los límites internacionales de México son: al norte con Estados Unidos con una longitud de línea fronteriza de 3,152 km; al sureste con Guatemala y Belice 956 km y 193 km, respectivamente; al sur y oeste con el océano Pacífico y al este con el Golfo de México y el Mar Caribe. La longitud total de línea de costa es de 11,122 km 70.4% (7,828 km) en el océano Pacífico y 29.6% (3,294) en el Golfo de México y Mar Caribe INEGI (2011).

México tiene una superficie de 1, 964,375 km², de los cuales 1, 959,248 km son continentales y 5127 km están en sus islas. Es el décimo cuarto lugar en extensión territorial a nivel mundial, y el quinto en el continente americano. Políticamente es una federación conformada por 32 entidades. Su topografía es muy variada, lo que influye en las condiciones climáticas, tipos de suelos y vegetación predominante. Los usos de suelo y cubierta de vegetación son también muy variados INEGI (2005).

El clima de México está determinado por varios factores, tales como la altitud sobre el nivel del mar, la latitud geográfica, las diversas condiciones atmosféricas y la distribución de tierra y agua. En consecuencia, el país cuenta con una gran

diversidad de climas, los cuales de manera muy general pueden clasificarse, según su temperatura, en cálido y templado; y de acuerdo con la humedad existente en el medio, en húmedo, subhúmedo, seco y muy seco.

El clima cálido se subdivide en cálido húmedo y cálido subhúmedo. El primero ocupa 4.7% del territorio nacional y se caracteriza por tener una temperatura media anual entre 22 °C y 26 °C y precipitaciones de 2,000 a 4,000 mm anuales (INEGI, 2012).

El clima cálido subhúmedo se encuentra en 23 % del país; en él se registran precipitaciones entre 1,000 y 2,000 mm anuales y temperaturas que oscilan de 22 °C a 26°C, con regiones que superan esta última (INEGI, 2012).

El clima templado se divide en húmedo y subhúmedo; en el primero se registran temperaturas entre 18 °C y 22 °C y precipitaciones en promedio de 2,000 a 4,000 mm anuales; comprende 2.7 % del territorio nacional.

El clima templado subhúmedo se encuentra en 20.5 % del país; en su mayoría presenta temperaturas entre 10 °C y 18 °C y de 18 °C a 22 °C; sin embargo en algunas regiones puede disminuir a menos de 10 °C; se caracteriza por precipitaciones de 600 a 1,000 mm en promedio durante el año CONAGUA (2012).

El clima seco se encuentra en la mayor parte del centro y norte del país, regiones que comprenden 28.3 % del territorio nacional; se caracteriza por escasa nubosidad y precipitaciones de 300 a 600 mm anuales, con temperaturas

promedio de 22 °C a 26 °C en algunas regiones, y en otras de 18 °C a 22 °C (INEGI, 2012).

El clima muy seco registra temperaturas promedio de 18 °C a 22 °C, con casos extremos de más de 26°C; presenta precipitaciones anuales de 100 a 300 mm en promedio, y se encuentra en 20.8 % del país (INEGI, 2012).

5.2 Datos climáticos

Los datos climáticos empleados para la presente investigación son datos instrumentales históricos diarios de temperaturas máximas registradas en México que varían desde el año 1940 - 2010 proporcionados por el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) de la Comisión Nacional de Agua (CNA). Cabe mencionar que los datos fueron evaluados previamente aplicando criterios de calidad como se ha sugerido en estudios climáticos (Alexander *et al.*, 2006; IPCC, 2007; Méndez *et al.*, 2010).

Son 580 estaciones climatológicas analizadas para esta investigación, distribuidas razonablemente en todo el país (Figura 1). Las cuales se seleccionaron de acuerdo a criterios como un tiempo de registro mayor o igual a 40 años con más del 80 % de la información en la toma de datos diarios y que estos presenten consistencia anual e interanual y homogeneidad en las series. La información contenida en las series de datos es: número de estación climatológica, año de registro, mes de registro y la temperatura máxima en °C de los días en que se haya tenido registro.

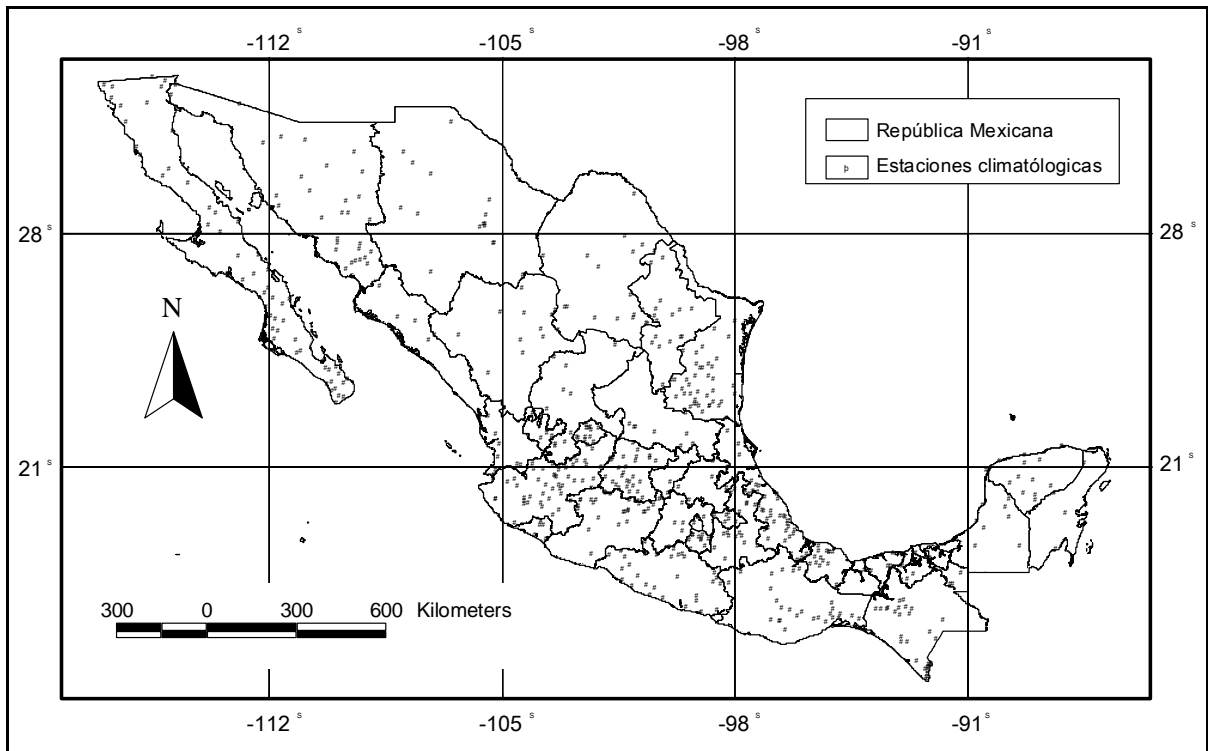


Figura 1. Área de estudio y distribución geográfica de las 580 estaciones climatológicas utilizadas en el presente estudio.

5.3 Procedimiento y análisis estadístico

Debido a la cuantiosa información de análisis, los datos están ordenados por estación climatológica y fueron procesados en una hoja de cálculo de Excel (a través de una macro) para obtener los índices climáticos de temperatura máxima que se definen en la (Tabla 1).

Tabla 1. Variables o índices climáticos derivados de temperatura máxima, analizados en la presente investigación.

Índice	Nombre	Definición	Unidades
T _m	Temperatura media de la máxima	Temperatura media del mes i (°C).	°C
T _{max}	Temperatura máxima de la máxima	Temperatura máxima del mes i (°C).	°C
T _{min}	Temperatura mínima de la máxima	Temperatura mínima del mes i (°C)	°C
NDT ₃₀	Días con temperatura ≥ 30°C	Número de días del mes i con temperatura ≥ 30 °C (n)	días
T _{m30}	Temperatura media de días ≥30°C	Temperatura media del mes i con NDT30 (°C).	°C
NDT ₃₅	Días con temperatura ≥ 35°C	Número de días del mes i con temperatura ≥ 35 °C (n).	días
T _{m35}	Temperatura media de días ≥35°C	Temperatura media del mes i con NDT35 (°C).	°C
NDT ₄₀	Días con temperatura ≥ 40°C	Número de días del mes i con temperatura ≥ 40 °C (n).	días
T _{m40}	Temperatura media de días ≥40°C	Temperatura media del mes i con NDT40 (°C).	°C
DE	Desviación estándar	Desviación estándar de temperatura del mes i (°C).	°C

Para obtener las tendencias de los índices de temperatura máxima, se utilizó la prueba de Mann-Kendall obteniendo la significancia estadística de la variable ($p \leq 0.10$) y de ellas estimar la pendiente (S). La evaluación de datos se lleva a cabo con el test no paramétrico de Mann-Kendall (MK) propuesto y descrito por Hirsch *et al.* (1982), el cual es una modificación en la prueba de Mann (1945) y Kendall (1975), que detecta cambios en la media de los datos y no asume independencia entre ellos, lo cual resulta útil para su utilización con datos que presenten una componente estacional, como son generalmente los datos climatológicos. Fioravanti *et al.* (2015), Xia *et al.* (2015), Viola *et al.* (2014), Jhajharia *et al.* (2014) han empleado en varias partes del mundo dicha prueba.

Para el cálculo de (MK), se consideró la hipótesis nula: no hay tendencia en la serie (estable en media) y como hipótesis alterna: existe tendencia en la serie.

La prueba de MK considera solo valores relativos de todos los términos de la serie $X = (x_1, x_2, x_3)$ a analizar.

La estadística de prueba MK viene dada por:

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{sgn}(X_j - X_k)$$

Donde X_i y X_k son los valores de los datos secuenciales, es el conjunto de datos la longitud de registro, y

$$\text{sgn}(\theta) = \begin{cases} 1 & \theta > 0 \\ 0 & \text{si } \theta = 0 \\ -1 & \theta < 0 \end{cases}$$

Bajo la hipótesis nula de ninguna tendencia, y el supuesto de que los datos son independientes e idénticamente distribuidos, la media cero y varianza S denotada por σ^2 se calcula como:

$$\sigma^2 = \frac{n(n-1)(2n-5)}{18}$$

La varianza normal estándar se utiliza para las pruebas de hipótesis, y se designa como el índice de tendencia estadística de prueba Z , de la siguiente manera:

$$Z = \begin{cases} \frac{s-1}{\sigma} & S > 0 \\ 0 & \text{si } S = 0 \\ \frac{s+1}{\sigma} & S < 0 \end{cases}$$

Así, en una prueba de dos colas para la tendencia, la H_0 que no existe una tendencia en el conjunto de datos, o bien se rechaza o se acepta en función de si el estadístico Z calculado es mayor o menor. El valor positivo de Z muestra una tendencia creciente y su valor negativo muestra una tendencia decreciente.

En este estudio la magnitud de la tendencia se estimó usando un método de la pendiente no paramétrica propuesto por Sen (1968).

$$\beta = \text{Median} \left[\frac{x_j - x_k}{j - k} \right] \text{ para todo } k < j$$

Donde $1 < k < j < n$. β es la mediana de todas las posibles combinaciones de pares para todo el conjunto de datos.

Los patrones geográficos de las tendencias mensuales de los índices climáticos de la temperatura máxima se obtuvieron realizando interpolaciones en el sistema de información geográfica ArcView Gis 3.2 utilizando el método de IDW (Inverse Distance Weighted) y los valores de slope (pendiente).

6 RESULTADOS

6.1 Variaciones en índices climáticos de Temperatura máxima

Los dos índices que mostraron el mayor porcentaje de estaciones significativas positivas y negativas ($p < 0.10$) fueron Temperatura media (T_m) 35.52% y Temperatura máxima (T_{max}) con 35 % del total. Los índices que sufrieron los menores cambios fueron: Temperatura media de días con temperatura $\geq 40^\circ\text{C}$ (3.02 %) y el número de días con temperatura $\geq 40^\circ\text{C}$ (9.28 %). Cabe mencionar que estos dos últimos se presentaron en menor porcentaje debido a que hubo menos registros en los datos. En promedio los índices Ndt_{30} , DE , T_{m30} , Ndt_{35} , T_{min} y T_{m35} registran cambios en sus tendencias del orden de 25 % del total de estaciones analizadas (Figura 2).

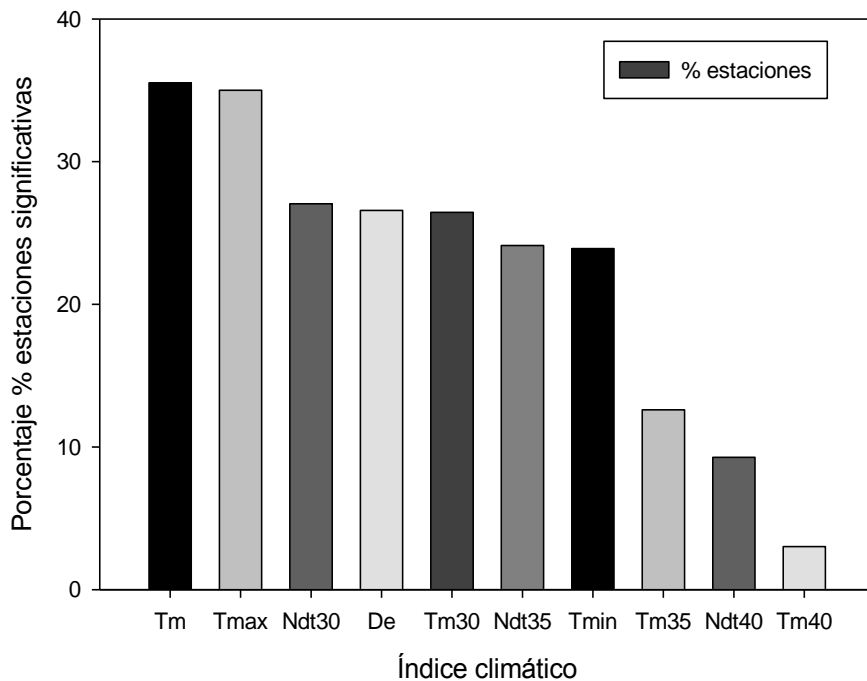


Figura 2. Porcentaje de estaciones climatológicas que mostraron tendencias significativas ($p < 0.10$) en cada índice climático de temperatura máxima en México.

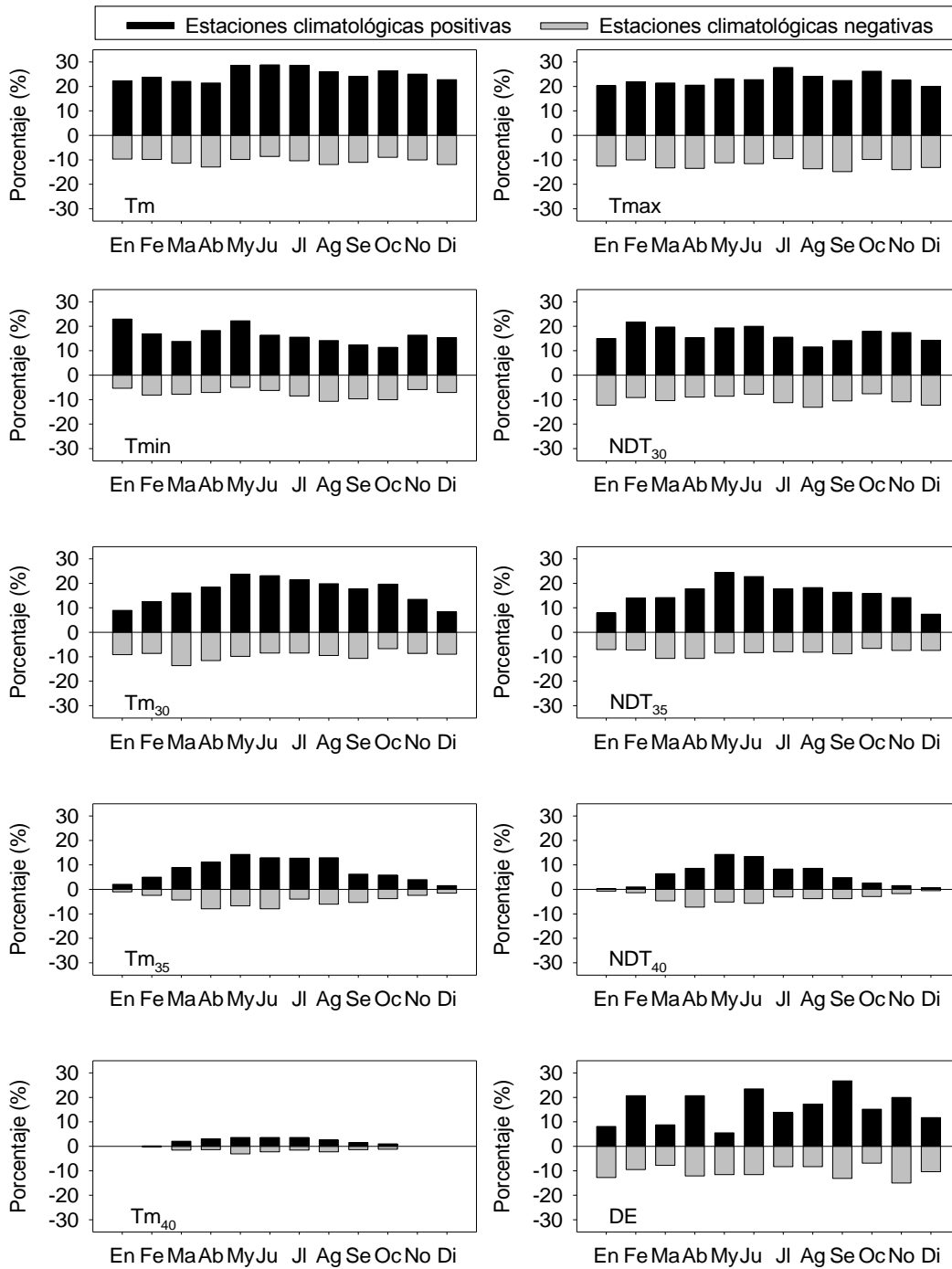


Figura 3. Distribución porcentual de estaciones que mostraron tendencia significativa ($p < 0.10$) en los diferentes índices climáticos de temperatura máxima en México.

6.1.1 Temperatura media

La temperatura media (de las máximas) resultó tener un 35.52 % de estaciones (del total de las evaluadas) con cambios significativos estadísticamente; en promedio el 24.98 % (Figura 2) muestran aumento de temperatura, el incremento se estimó en $0.069\text{ }^{\circ}\text{C.año}^{-1}$ hacia regiones pequeñas del noroeste, occidente y sur del país. El 10.53 % de estaciones está mostrando disminución de temperatura hacia algunas zonas aisladas del norte de México (Figura 6).

6.1.2 Temperatura máxima

Los registros más altos de temperatura máxima (T_{max}), muestran un incremento en el país en todos los meses del año. Las estaciones estadísticamente significativas ocurrieron en un 35% sobre el total de las analizadas (580), de estas, el 65 % presentaron aumento en temperatura de $0.053^{\circ}\text{C.año}^{-1}$ (Figura 7) en el occidente y sur del País. En regiones aisladas en el norte y centro del país registraron decremento (34.97 % del total).

6.1.3 Días con temperatura $\geq 30^{\circ}\text{C}$

El índice NDT_{30} tiende a ser inconsistente durante el año, en promedio el porcentaje de estaciones que manifestaron aumentos en los días con temperaturas $\geq 30^{\circ}\text{C}$ fue de 16.82 % (Figura 3) del total de estaciones. Contrariamente a ello 10.21 % de las estaciones manifestó decremento de NDT_{30} . En total 27.04 % de estaciones representan los cambios estadísticamente importantes para las diferentes regiones del país (Figura 8).

6.1.4 Desviación estándar de temperatura máxima

La desviación estándar denota la variación de temperatura. En promedio las tendencias para DE se mostraron en un 26.58 % (Figura 2) del total de estaciones climáticas; de este, los cambios crecientes se estimaron en 60.38 % mostrándose muy variables e inconsistentes durante el año, sin embargo se nota un incremento de la variación de temperatura máxima hacia la península de Baja California, con un incremento del orden de $0.042 \text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{año}^{-1}$ (Figura 9). Por otro lado, las tendencias decrecientes fueron 39.61 % del total de las significativas.

6.1.5 Temperatura media de días con temperatura $\geq 30 \text{ }^{\circ}\text{C}$

Este índice (T_{m30}) se intensifica a partir de primavera y verano en los meses de marzo a agosto. En promedio un 17 % del total de estaciones climatológicas (Figura 2) resultaron con tendencia positiva, según la prueba no paramétrica de Mann-Kendall, y el 9 % de las estaciones climatológicas apenas obtuvo tendencias negativas. Los cambios más importantes ocurren en el noroeste y los estados del golfo de México, en regiones amplias y consistentes en tendencia, con incrementos de $0.038^{\circ}\text{C}\cdot\text{año}^{-1}$ (Figura 10). En total 26.45 % de estaciones climatológicas mostraron tendencia significativa ($p \leq 0.10$).

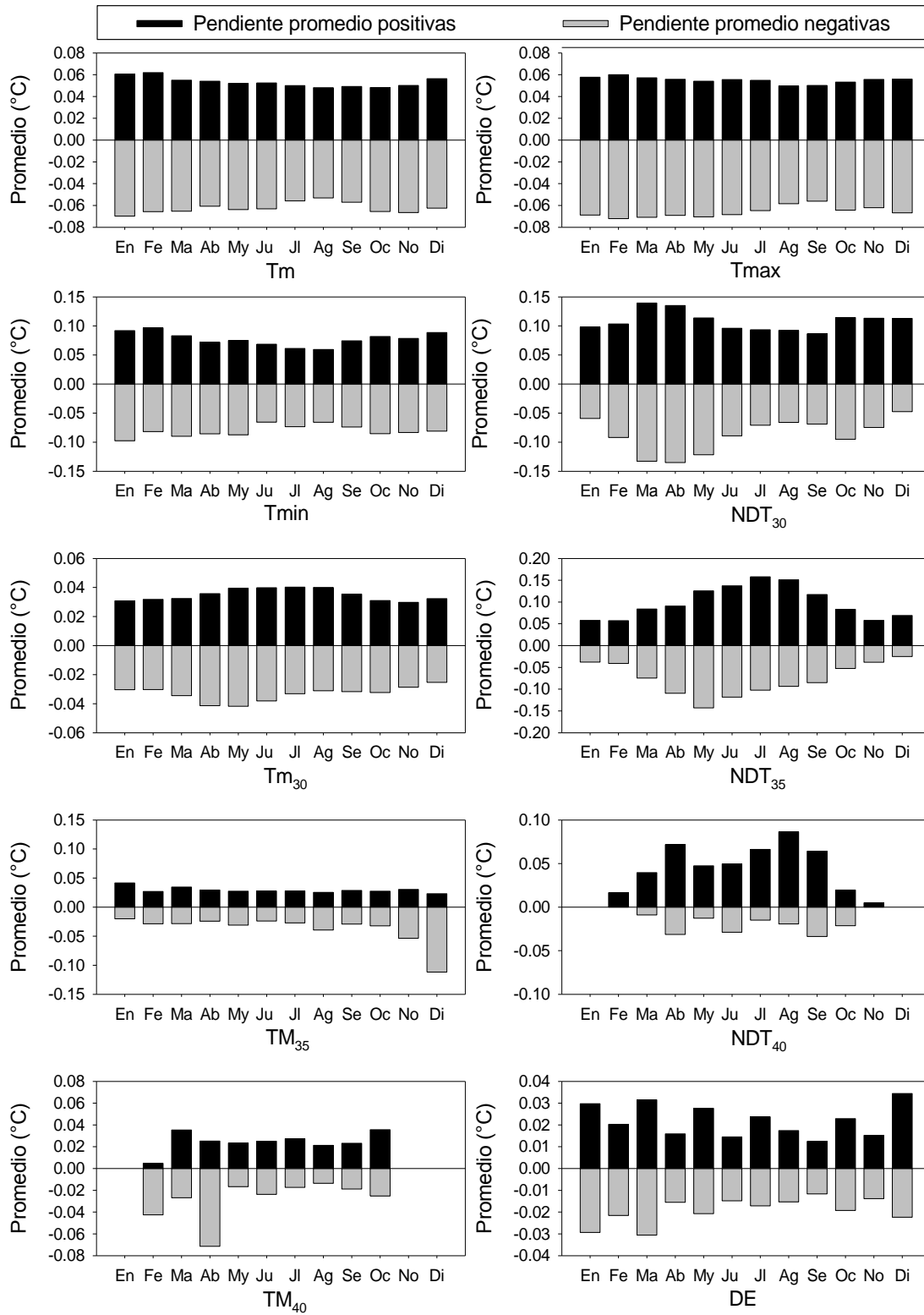


Figura 4. Valores de la pendiente promedio mensual por cada índice climático de temperatura máxima en México.

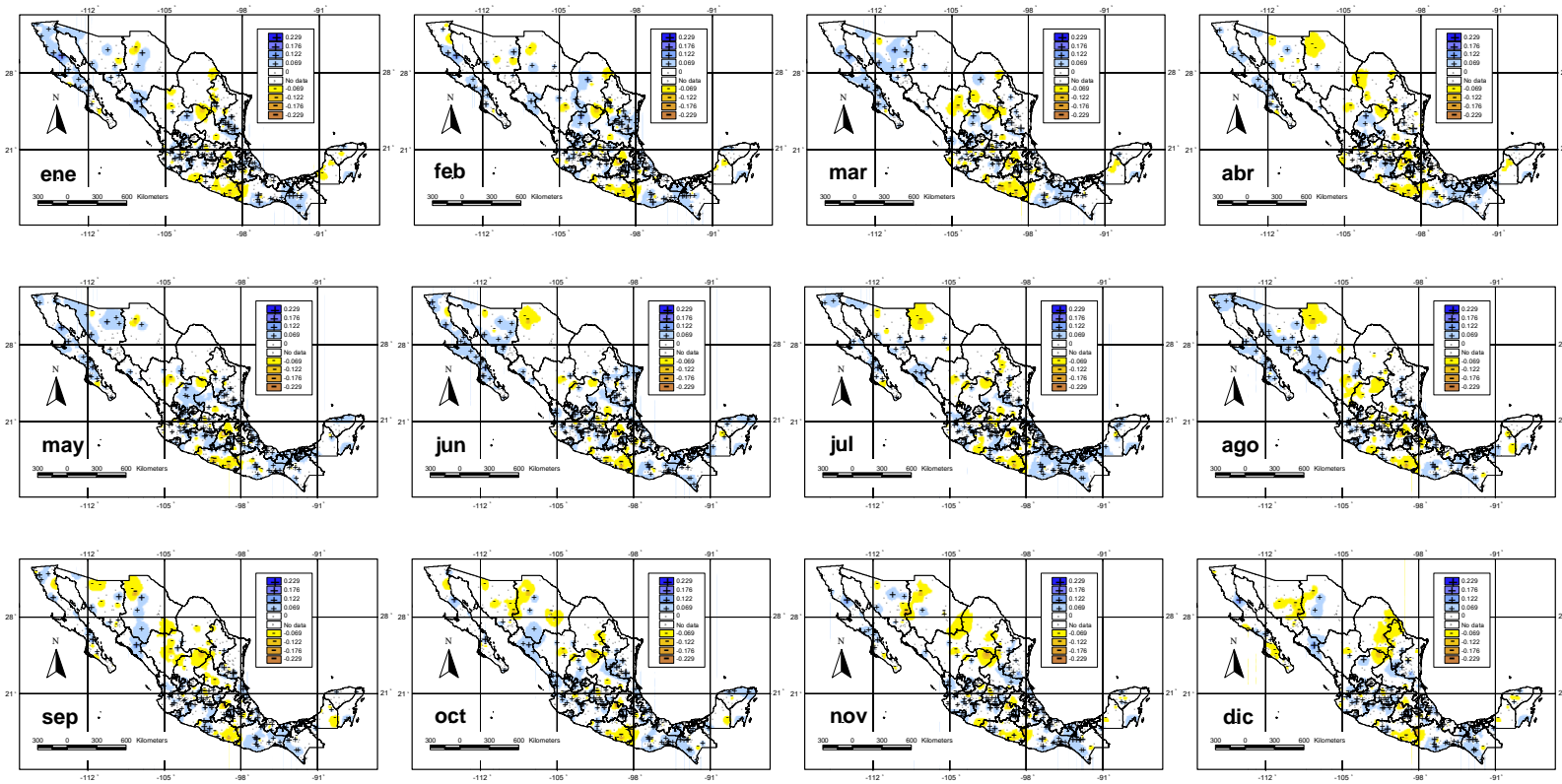


Figura 5. Patrones geográficos de tendencias de temperatura media, de la máxima (T_m , $^{\circ}\text{C}\cdot\text{año}^{-1}$) en México.

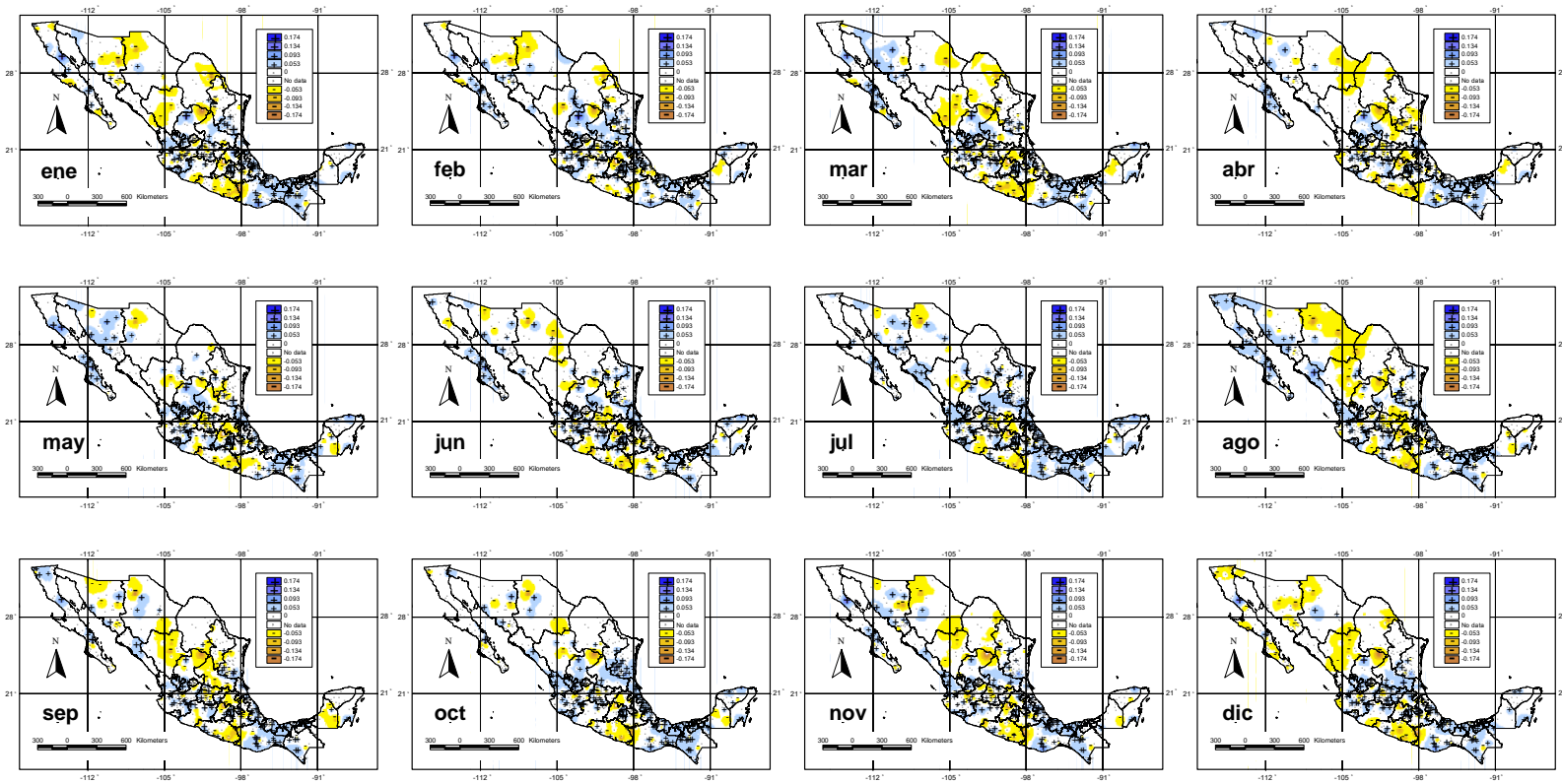


Figura 6. Patrones geográficos de tendencias de temperatura máxima, de la máxima (Tmax, °C.año⁻¹) en México.

6.1.6 Días con temperatura $\geq 35^{\circ}\text{C}$

Se resalta la ausencia de cambios significativos (positivos y negativos) en la parte norte del país en los meses de noviembre a febrero. Tendencias significativas (aumento y decremento) ocurrieron en un 24.12 % (Figura 2) del total de estaciones climatológicas analizadas, mostrando una fuerte consistencia en la incidencia de días con temperatura $\geq 35^{\circ}\text{C}$ de mayo a agosto (Figura 11) en un porcentaje promedio de 16 %, mientras tanto la presencia de estos días disminuye en 1.84 días cada diez años, en un promedio del 8 % respecto del total de estaciones.

6.1.7 Temperatura mínima

El rango de incremento y decremento de este índice de temperatura máxima (temperatura mínima de las máximas) se estimó en $\pm 0.082^{\circ}\text{C.año}^{-1}$ (Figura 12), este rango se manifestó heterogéneamente en las estaciones que tuvieron incrementos. En promedio 25 % del total de estaciones mostraron tendencias positivas, y menos de la mitad, 10 % mostraron tendencias negativas en regiones dispersas por todo el país. El porcentaje de estaciones que mostraron significancia estadística fueron 24.12 % del total de las estaciones evaluadas.

6.1.8 Temperatura media de los días con temperatura $\geq 35^{\circ}\text{C}$

Los resultados derivaron que la temperatura media $\geq 35^{\circ}\text{C}$ manifestó muy pocas estaciones 12.6 % (Figura 2) del total con alguna significancia durante el año, lo anterior es claramente explicado porque existen pocos lugares con este registro

de temperatura. Tan solo 73 estaciones registraron temperaturas $\geq 35^{\circ}\text{C}$. Los cambios significativos ($p \leq 0.10$) positivos y negativos se observan geográficamente en escalas locales, con un total de 8 % y 4.5 % de estaciones climatológicas (Figura 3) respectivamente. La evidencia de estos cambios se presentó en el segundo cuatrimestre del año (Figura 13), con una tasa de incremento de $0.097^{\circ}\text{C.año}^{-1}$.

6.1.9 Días con temperatura $\geq 40^{\circ}\text{C}$

Este índice (NDT_{40}) mostró pocos cambios en su tendencia, solo el 9.28 % (Figura 2) del total de estaciones demostraron cambios estadísticamente significativos, de este, el 63 % resultó con incrementos, muy por encima de las estaciones que registran cambios negativos, los cuales son de 37 %. El incremento de días $\geq 40^{\circ}\text{C}$ se registra de forma dispersa en el noroeste del país (costa de sonora y localidades de baja california), de mayo a agosto. La presencia de días con temperaturas superiores a 40°C se estima aumente 1.1 días cada diez años. (Figura 14).

6.1.10 Temperatura media de días con temperatura $\geq 40^{\circ}\text{C}$

El incremento en la Tm_{40} se estimó en $0.024^{\circ}\text{C.año}^{-1}$. Los cambios de este índice en México son mínimos, se registra solo 3.02 % del total de estaciones climáticas estudiadas; el patrón de distribución de este índice (Figura 15) señala a la mayoría de las estaciones climatológicas sin registro de datos y sin algún valor de significancia importante. En promedio 1.5 % resultó con tendencias negativas (Figura 3). Los meses en los que se registró incidencia de incrementos en Tm_{40}

fueron de mayo a julio, los cuales representan un 3.62 % promedio del año (Figura 3) cuya distribución geográfica se ubica dispersa sobre zonas aisladas de Baja California Sur y de Sonora.

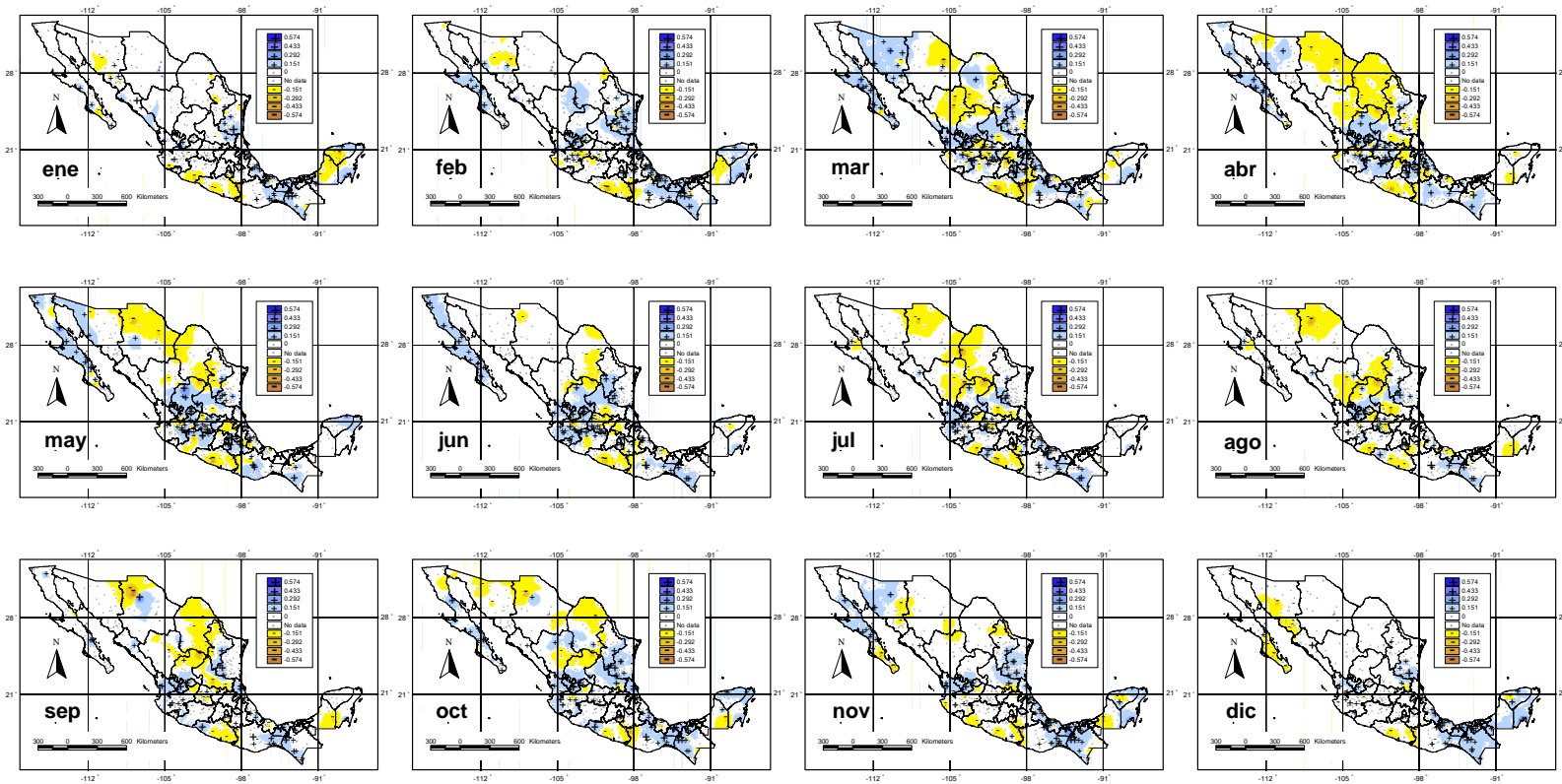


Figura 7. Patrones geográficos de tendencias del número de días con temperatura ≥ 30 °C (NDT_{30} , °C.año⁻¹) en México.

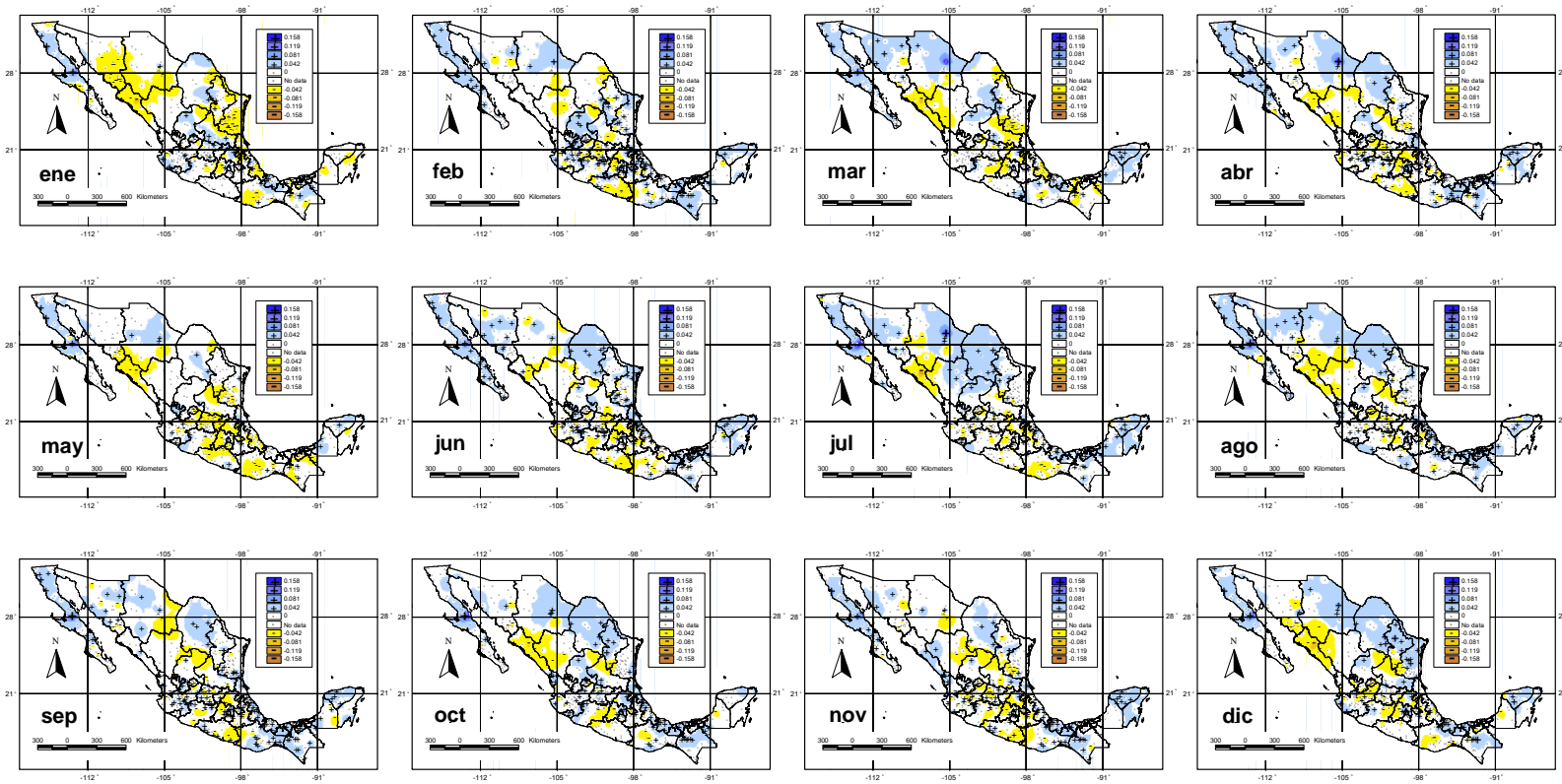


Figura 8. Patrones geográficos de tendencias de la desviación estándar de temperatura máxima (DE, °C.año⁻¹) en México.

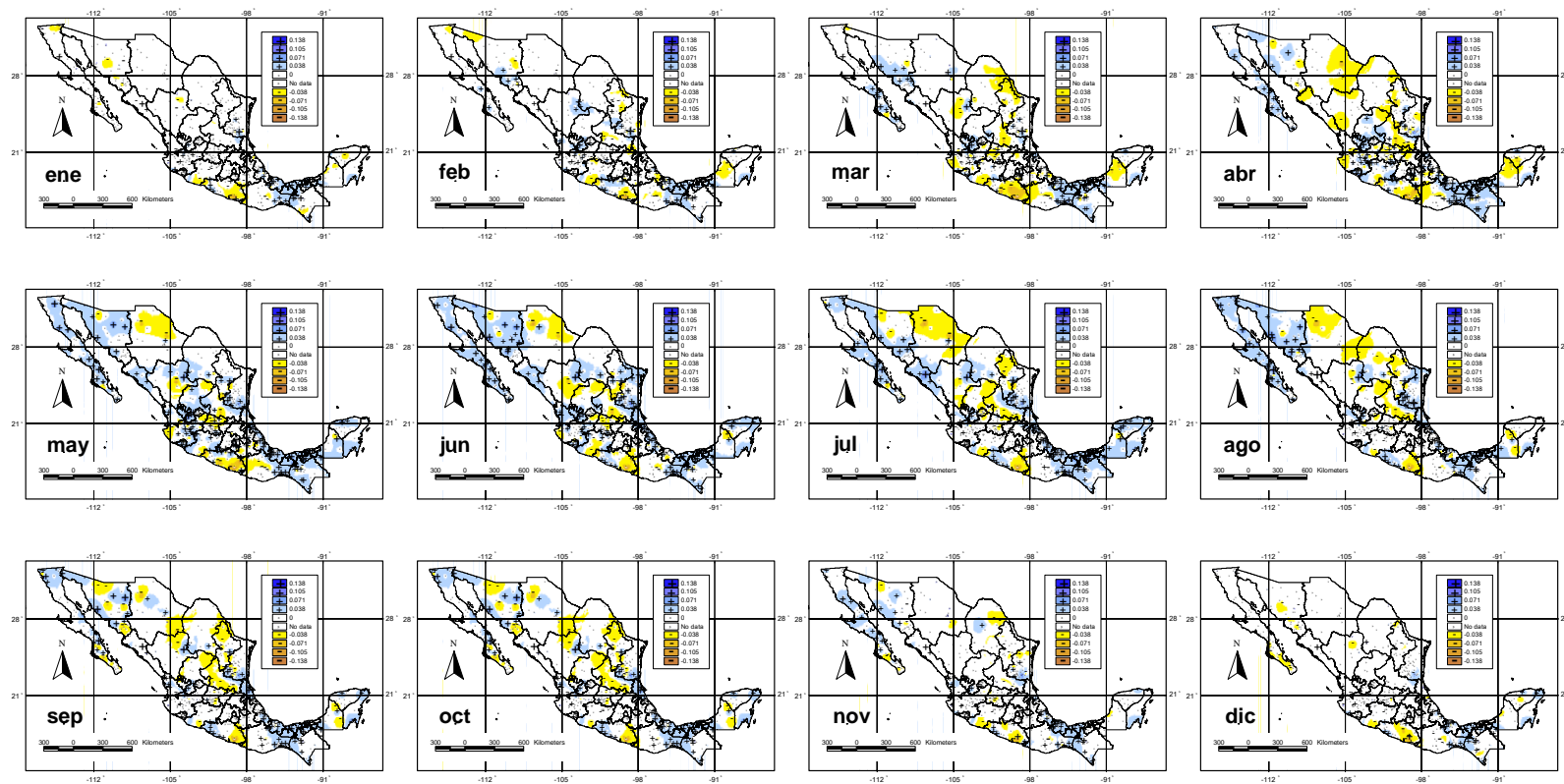


Figura 9. Patrones geográficos de tendencias de temperatura media de días mayor a 30°C (NDT_{30} , $^{\circ}C.a\tilde{n}o^{-1}$) en México.

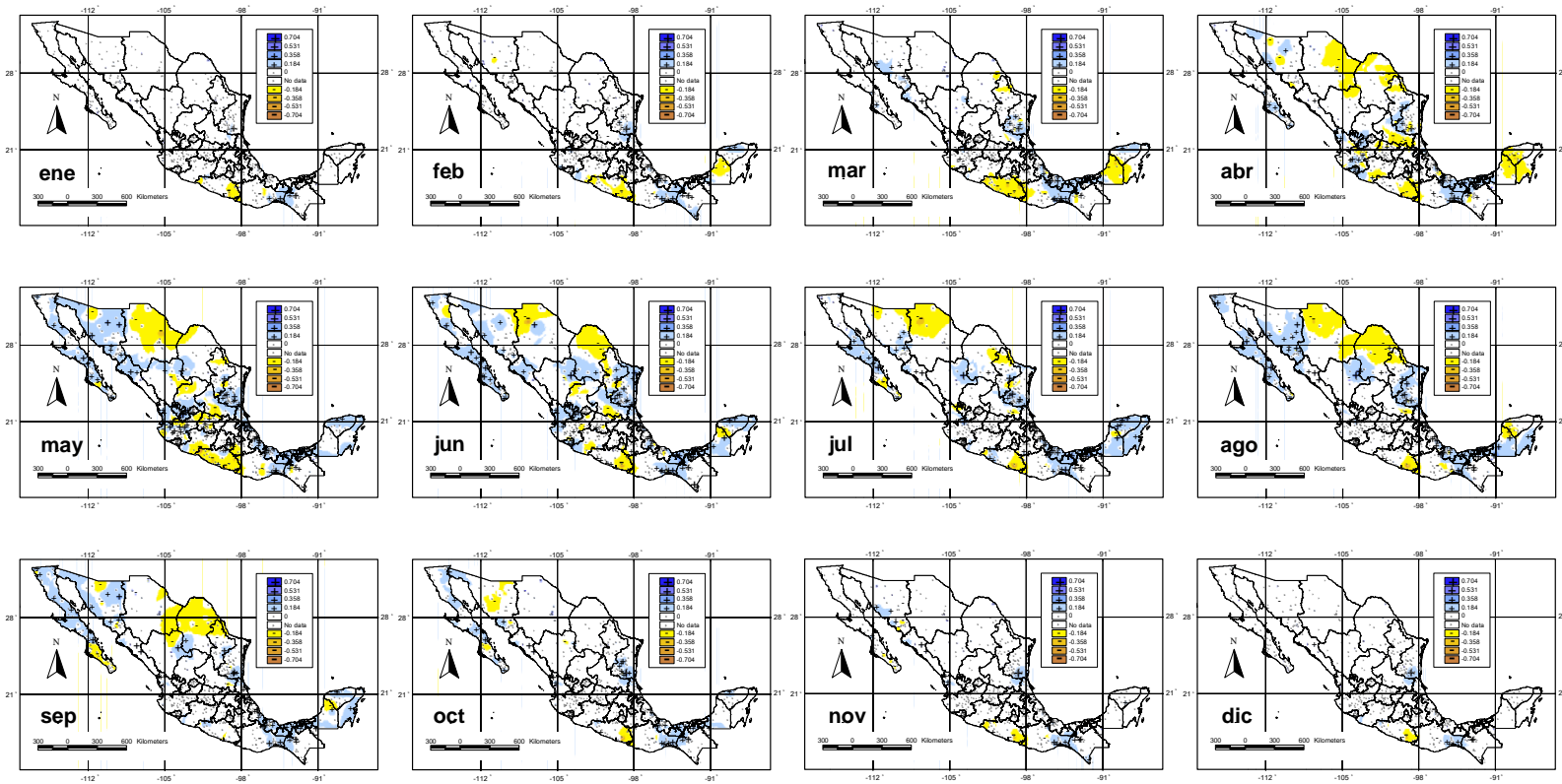


Figura 10. Patrones geográficos de tendencias del número de días con temperatura ≥ 35 °C (NDT_{35} , °C.año⁻¹) en México.

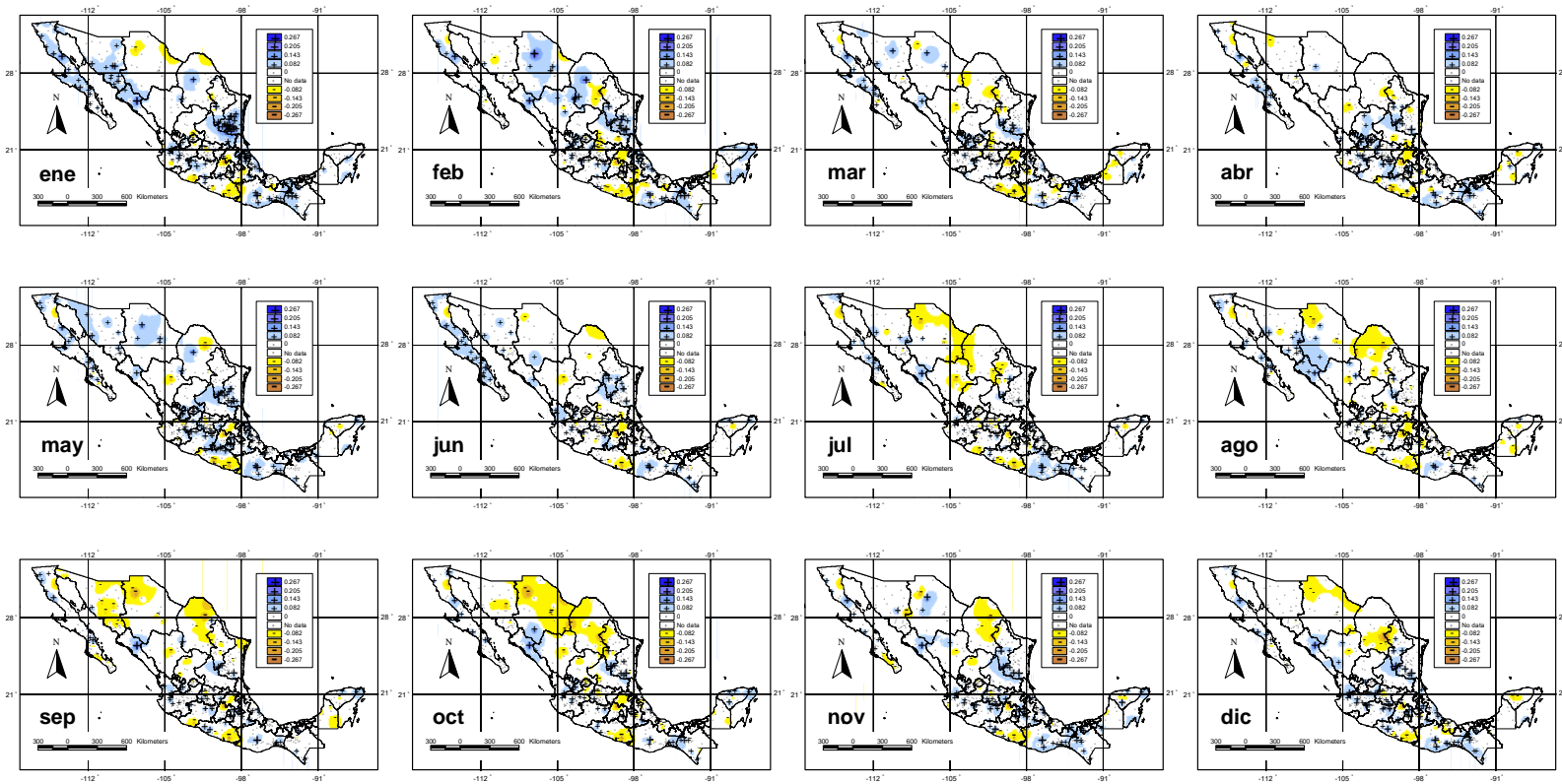


Figura 11. Patrones geográficos de tendencias de temperatura mínima, de las máximas (T_{min} ; $^{\circ}\text{C}\cdot\text{año}^{-1}$) en México.

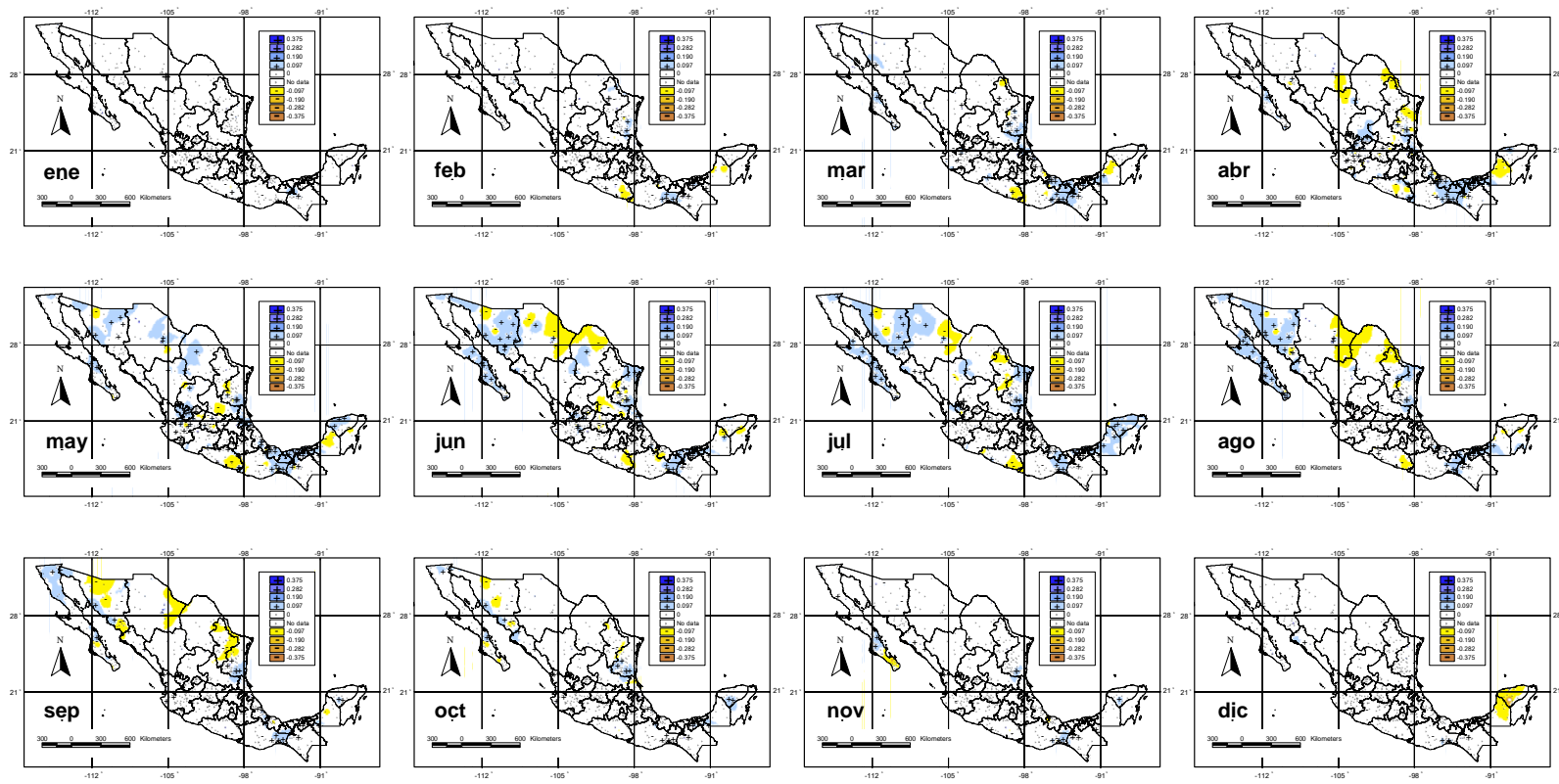


Figura 12. Patrones geográficos de tendencias de temperatura media de días con temperatura ≥ 35 °C, (Tm_{35} , °C.año⁻¹) en México.

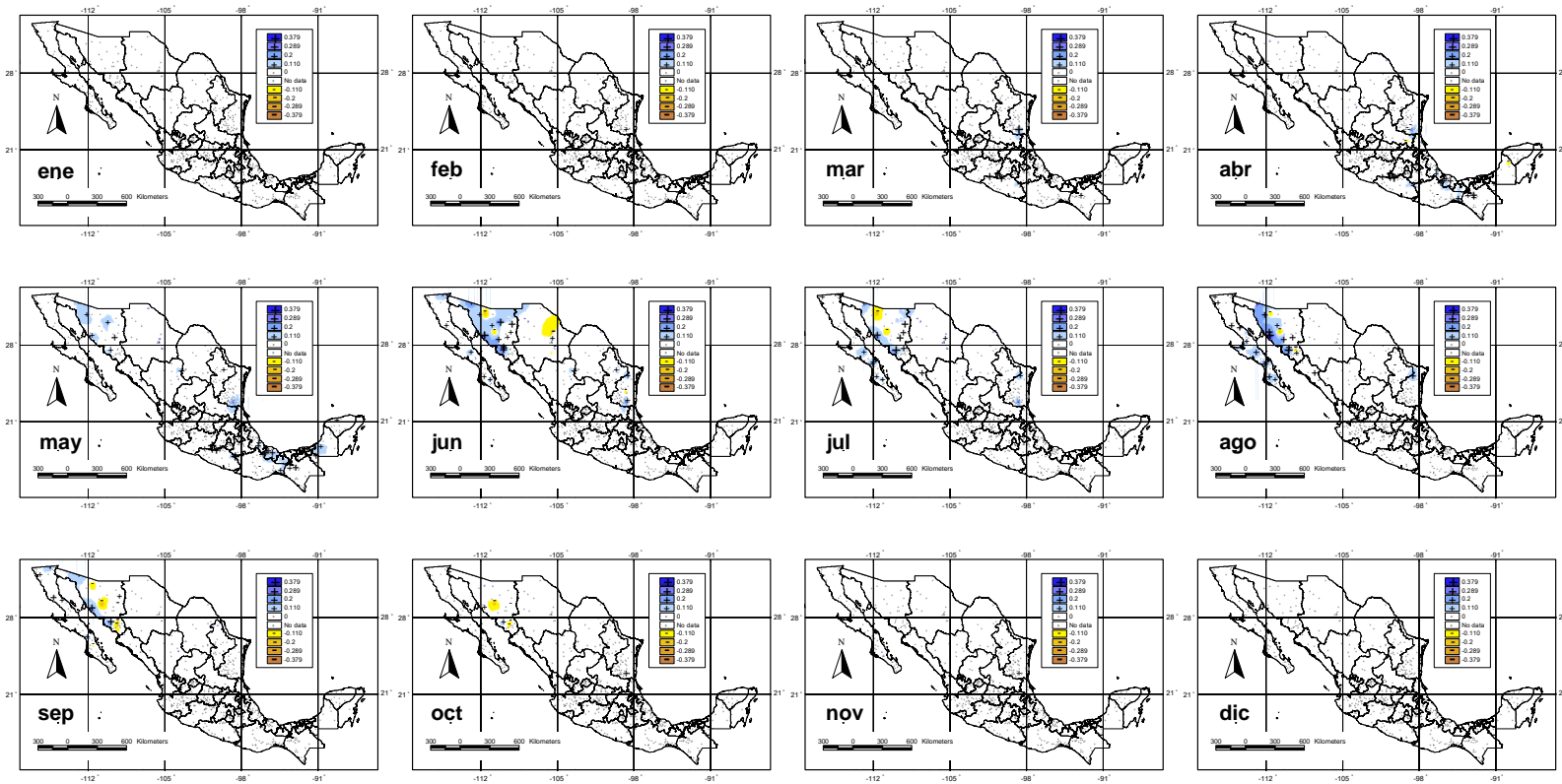


Figura 13. Patrones geográficos de tendencias del número de días con temperatura ≥ 40 °C (NDT_{40} , °C.año⁻¹) en México.

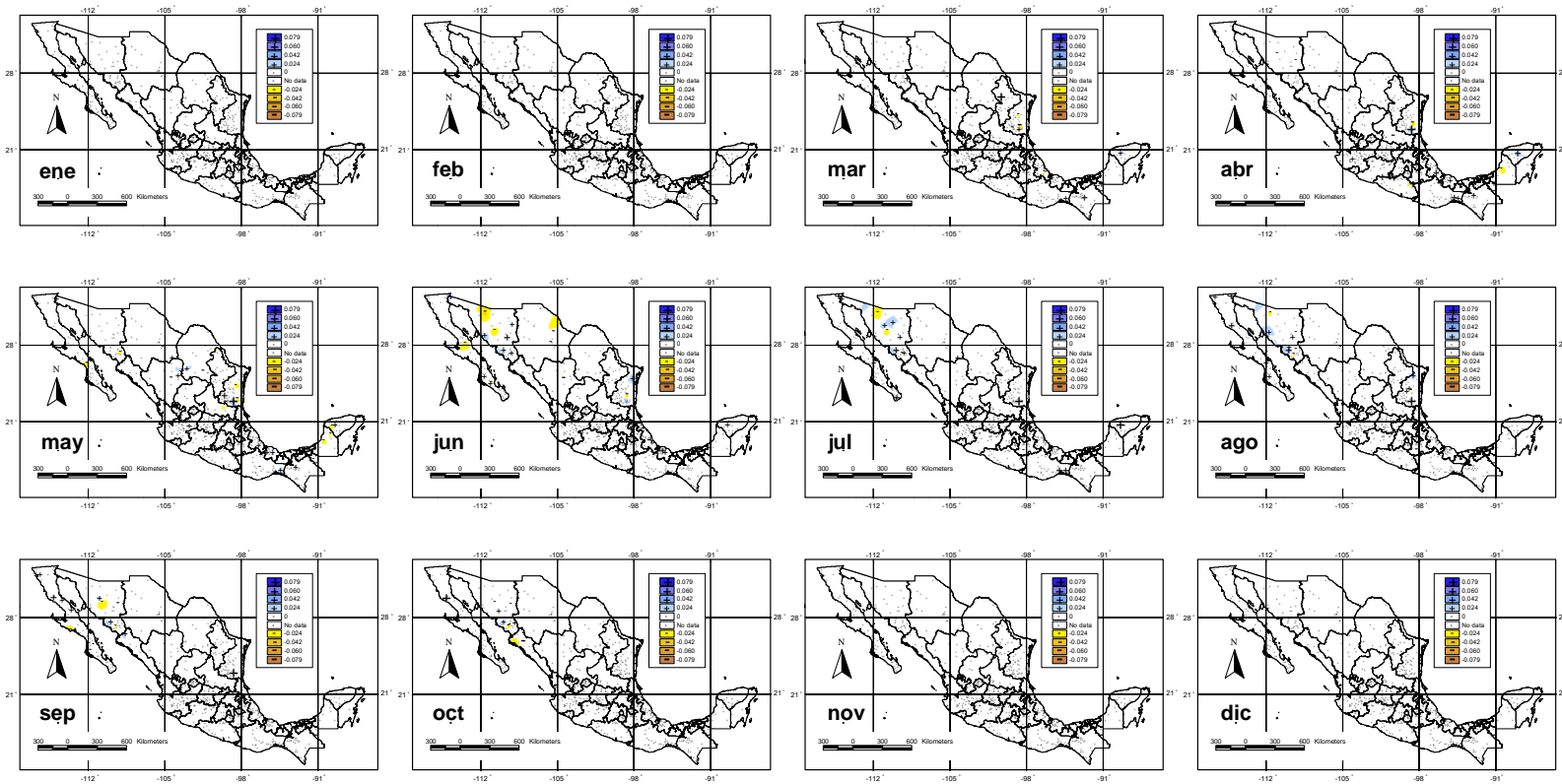


Figura 14. Patrones geográficos de tendencias de temperatura media de días con temperatura ≥ 40 °C (Tm_{40} , °C.año⁻¹) en México.

7 DISCUSIÓN

Diversos autores han documentado la existencia del cambio climático, por ejemplo Santana *et al.* (2009) mencionan que en primavera en Chile se registraron aumentos de temperatura media anual, resultado similar al obtenido en esta investigación, donde el aumento de días con temperatura ≥ 30 °C también incrementa en primavera (Figura 3).

Según el IPCC (2007), las temperaturas globales superficiales medias han aumentado en un 0.76 ± 0.18 °C en los últimos 100 años (1906 - 2005). Easterling *et al.* (1997) afirman que los mayores aumentos de temperatura están ocurriendo en el Hemisferio Sur; con la adición de datos para América del Sur, Nueva Zelanda, gran parte de Australia, algunas islas del Pacífico, e Indonesia este aumento es de 0.10 °C.año⁻¹, cifra similar a la registrada para algunos índices de temperatura máxima de esta investigación (T_{min} y T_{m35}).

Intentos por evidenciar el calentamiento global en términos científicos han sido realizados desde hace algunos años, Cane *et al.* (1997) refieren que la temperatura superficial de la tierra ha aumentado en los últimos 100 años de entre 0.3 y 0.6 °C; sin embargo, no definen cuáles son las causas de este aumento de temperatura. Shrestha *et al.* (1999) encontraron que las distribuciones de las tendencias estacionales y anuales de temperatura muestran altas tasas de calentamiento que van desde 0.068 a 0.128 °C.año⁻¹ en la mayor parte de la Montaña Oriente y regiones del Himalaya, cuya tasa de incremento es similar a la registrada en México en temperatura máxima.

Recientemente, el calentamiento global y el cambio climático, son de gran interés dentro de la comunidad científica, en este sentido se han encontrado varios autores que afirman que los cambios significativos de temperatura se han experimentado en los últimos años. Oyler *et al.* (2015) no esperaba encontrar cambios importantes en la temperatura al oeste de Estados Unidos, sin embargo resultó que temperatura mínima está disminuyendo en un rango de $0.116\text{ }^{\circ}\text{C.año}^{-1}$. En Italia Longobardi y Mautone (2015) realizaron un análisis de tendencias de la temperatura anual y estacional al sur de Italia, destacando en sus resultados que las tendencias positivas son predominantes (patrones similares a los registrados en México), tanto a escala anual como estacional; el 34 % de las estaciones totales, a escala anual son positivas, cuya magnitud de las tendencias positivas y negativas resultó ser de 0.085 a $-0.15\text{ }^{\circ}\text{C.año}^{-1}$ respectivamente. También, Fioravanti *et al.* (2015) trabajando con series diarias de temperatura máxima y mínima, con el objetivo de estudiar las variaciones recientes en la frecuencia e intensidad de temperaturas extremas en Italia, demuestran que se observa un calentamiento general sobre el país, donde los cambios más importantes ocurren en primavera verano, y más débiles en invierno y otoño, esto también es similar a lo que ocurre en México.

En China, Xia *et al.* (2015) encontraron cambios importantes en series de temperatura máxima y mínima, los resultados mostraron una tendencia al calentamiento (a una tasa de $0.4\text{ }^{\circ}\text{C.decada}^{-1}$) sobre una escala estacional para el invierno.

Similar a lo que se registra en México, en Canadá, Amos *et al.*, (2014) revelan que la temperatura se está incrementando en la zona costera de Columbia Británica, esto está ocurriendo en todos los meses del año, pero son más evidentes durante el verano (julio-septiembre). Los resultados de la presente investigación demuestran que la temperatura máxima está cambiando (especialmente incrementando) en todos los meses del año, al parecer estos patrones ocurren de forma similar en hemisferio norte.

Un estudio realizado por Cowtan y Way (2014) en el archipiélago Svalbard situado en el océano Glacial Ártico, al norte de Europa, demuestra que la temperatura media anual está incrementando a una tasa de $2.6\text{ }^{\circ}\text{C.siglo}^{-1}$, es decir $0.026^{\circ}\text{C.año}^{-1}$; los cambios más altos se registran en primavera con $3.9\text{ }^{\circ}\text{C.siglo}^{-1}$ ($0.039^{\circ}\text{C.año}^{-1}$). Contrariamente a los resultados obtenidos en esta investigación, Zhang *et al.* (2014) obtuvieron mayores tendencias significativas en los datos instrumentales de temperatura mínima de la estación Huairou en Beijing en el periodo de 1960 - 2008, la cual aumenta $0.0388\text{ }^{\circ}\text{C.año}^{-1}$; mientras que el incremento de temperatura máxima es de $0.0096^{\circ}\text{C.año}^{-1}$; la magnitud de este incremento reportada por estos autores es mucho más baja que lo que se registra en México.

Abatzoglou *et al.* (2014) observaron cambios en el clima del noroeste Pacífico de los EE.UU. desde el siglo XX, estimaron que la temperatura media anual se incrementó aproximadamente a una tasa de $0.6\text{ a }0.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ en 50 años a través de indicadores que corroboran una temporada de congelación más duradera, y señalan que la temperatura de la noche más fría del año se incrementó. Como

puede observarse, los incrementos de temperatura que registran estos autores, es mucho más baja a lo que se registran en diferentes partes del mundo.

Por otra parte, Davydova (2015) afirma que la temperatura máxima anual promedio en México presenta un patrón distintivo donde los valores más elevados se ubican a lo largo de las cuencas ubicadas en las zonas costeras; de acuerdo al análisis de tendencias de temperatura máxima que realizó, en los últimos 40 años esta variable (temperatura máxima) registró un incremento (4 % del territorio nacional) en varias regiones de la península de Baja California, Sonora, Sinaloa y Durango. Estos resultados coinciden con el presente estudio.

Recientemente, Llorante (2012) en Madrid, España realizó un estudio muy semejante al nuestro, analizando la distribución espacial de tendencias mensuales temperatura media, temperatura máxima durante el periodo de 1981 – 2010 usando la prueba de Mann-Kendall, para determinar la significancia estadística y determinado la pendiente mediante el estimador de Sen, los incrementos que obtuvo para temperatura media, temperatura máxima y mínima fluctuaron entre 0.03 y 0.04°C.año⁻¹.

8 CONCLUSIONES

Las tendencias de los índices de temperatura máxima en el país registraron cambios importantes (desde 25 hasta más de 35 % del total de estaciones analizadas), evidenciando la ocurrencia de variaciones de la temperatura en el periodo 1940 - 2010. La predominancia de tendencias positivas (65.38 %) sobre las negativas (35.38 %) en los índices de temperatura máxima, demuestra que la temperatura y eventos cálidos en México están incrementando, ocurriendo en todos los meses del año, similar a lo que se registra en otros países. Se ha detectado que los índices extremos de temperatura máxima (temperatura y número de días mayores a 30 °C), también se están incrementado en extensas regiones del país (Baja California y Golfo de México), de forma consistente a escala regional. La detección de tendencias de incremento de la desviación estándar de temperatura máxima, evidencia la presencia de eventos extremos de temperatura máxima en los próximos años. La magnitud de los índices (T_m , T_{max} y $NDT30$) que sufren los mayores cambios son $0.069\text{ }^{\circ}\text{C.año}^{-1}$, $0.053\text{ }^{\circ}\text{C.año}^{-1}$ y $0.151\text{ dias.año}^{-1}$ respectivamente. Se aportan conocimientos específicos del comportamiento de temperatura máxima en México (1940 - 2010), así como su distribución geográfica, lo cual es importante para tomar decisiones para adaptarse al cambio climático, no obstante se requiere más información instrumental para fundamentar los estudios de detección climática.

9 LITERATURA CITADA

- Abatzoglou, J. T., Rupp, D. E., & Mote, P. W. (2014). Seasonal climate variability and change in the Pacific Northwest of the United States. *Journal of Climate*, 27(5): 2125-2142.
- Aguilar, E., T. C. Peterson, P. R. Obando, R. Frutos, J. A. Retana, M. Solera, J. Soley, I. G. Garcia, R. M. Araujo, A. R. Santos, V. E. Valle, M. Brunet, L. Aguilar, L. Alvarez, M. Bautista, C. Castanon, L. Herrera, E. Ruano, J. J. Sinay, E. Sanchez, G. I. H. Oviedo, F. Obed, J. E. Salgado, J. L. Vazquez, M. Baca, M. Gutierrez, C. Centella, J. Espinosa, D. Martinez, B. Olmedo, C. E. O. Espinoza, R. Nunez, M. Haylock, H. Benavides, and R. Mayorga, (2005). Changes in precipitation and temperature extremes in Central America and northern South America, 1961-2003. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres (1984-2012)* 110 (D23).
- Alexander, L. V., X. Zhang, T. C. Peterson, J. Caesar, B. Gleason, A. Tank, M. Haylock, D. Collins, B. Trewin, F. Rahimzadeh, A. Tagipour, K. R. Kumar, J. Revadekar, G. Griffiths, L. Vincent, D. B. Stephenson, J. Burn, E. Aguilar, M. (2006), Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres (1984–2012)*, 111 (D5).
- Amos, C. L., Martino, S., Sutherland, T. F., & Al Rashidi, T. (2014). Sea surface temperature trends in the coastal zone of British Columbia, Canada. *Journal of Coastal Research*. (31): 434-446 pp.

- Brohan, P., Kennedy, J. J., Harris, I., Tett, S. F., & Jones, P. D. (2006). Uncertainty estimates in regional and global observed temperature changes: A new data set from 1850. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres (1984–2012)*, 111(D12).
- Brunet, M. (2010). Datos e indicadores para detectar y atribuir eventos al cambio climático: los registros históricos del clima y su problemática. *Realidad, datos y espacio Revista Internacional de Estadística y Geografía*, 1: 19-29.
- Brunet, M. and D. López-Bonillo, (2001). Detecting and Modelling Regional Climate Change. 1a ed. Springer, 651 pp.
- Cane, M. A., Clement, A. C., Kaplan, A., Kushnir, Y., Pozdnyakov, D., Seager, R., & Murtugudde, R. (1997). Twentieth-century sea surface temperature trends. *Science*, 275, 957-960 pp.
- CENAPRED, 2001, 2011 Comisión intersecretarial de Cambio Climático 2012: México Quinta comunicación nacional ante la convención marco de las naciones unidas sobre el cambio climático. 169-441 pp.
- CONAGUA, 2012. Clima de México, 2012. http://smn.cna.gob.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=103&Itemid=80
- Cowan, K., & Way, R. G. (2014). Coverage bias in the HadCRUT4 temperature series and its impact on recent temperature trends. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 140(683): 1935-1944.

- Cunillera, J. (28 de marzo de 2015). Indicadores climáticos para el seguimiento. Servicio Meteorológico de Cataluña. Recuperado de: https://aca-web.gencat.cat/aca/documents/es/publicacions/escenaris_climatics/capitol3_lowress.pdf.
- Davydova, V. (2015). Variabilidad climática y sus efectos sobre las cuencas de México, Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. Recuperado de: <http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones/libros/639/variabilidad.pdf>.
- Easterling, D. R., Horton, B., Jones, P. D., Peterson, T. C., Karl, T. R., Parker, D. E., & Folland, C. K. (1997). Maximum and minimum temperature trends for the globe. *Science*, 277(5324): 364-367.
- Estrada, M. (15 de marzo de 2015). Cambio Climático Global: causas y consecuencias. Revista de información y análisis. Recuperado de: http://www.academia.edu/6789690/Cambio_clim%C3%A1tico_global_causas_y_consecuencias.
- Fioravanti, G., Piervitali, E., & Desiato, F. (2015). Recent changes of temperature extremes over Italy: an index-based analysis. *Theoretical and Applied Climatology*, 1-14.
- Hirsch, R. M., J. R. Slack and R. A. Smith (1982), "Techniques of trend analysis for monthly wáter quality data", *Water Resources Research*, 18(1), pp. 107-121.
- IDAG, T. Barnett, F. Zwiers, G. Hegerl, M. Allen, T. Crowley, N. Gillett, K. Hasselmann, P. Jones, B. Santer, R. Schnur, P. Scott, K. Taylor, S. Tett, and A. Int Ad Hoc Detection, 2005: Detecting and attributing external influences

on the climate system: A review of recent advances. *Journal of Climate*, 18, 1291-1314

INEGI (2005). Marco Geoestadístico Nacional 2005. <http://cuentame.inegi.org.mx/territorio/extension/default.aspx?tema=T>

INEGI, 2011. Anuario Estadístico de los Estados Unidos Mexicanos. Instituto Nacional de Geografía y Estadística. 45-155 pp.

INEGI, 2012. <http://cuentame.inegi.org.mx>.

IPCC, 2007: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Vol. I, Cambridge University Press, 996 pp.

Jaswal, A. K., Tyagi, A., & Bhan, S. C. (2015). Trends in Extreme Temperature Events over India During 1969–2012. In *High-Impact Weather Events over the SAARC Region* (pp. 365-382). Springer International Publishing.

Jhajharia, D., Dinpashoh, Y., Kahya, E., Choudhary, R. R., & Singh, V. P. (2014). Trends in temperature over Godavari river basin in southern peninsular India. *International Journal of Climatology*, 34(5), 1369-1384.

Kendall, M. G. (1975), *Rank Correlation Methods*, 4th Ed., Charles Griffin, London.

Llorante, M. O. (2012). Tendencias españolas de variables agrometeorológicas en los últimos 30 años (tesis de ingeniería). Universidad Politécnica de Madrid, 99 pp.

- Longobardi, A., & Mautone, M. (2015). Trend analysis of annual and seasonal air temperature time Series in southern Italy. In *Engineering Geology for Society and Territory, Springer International Publishing*. (3): 501-504).
- Magaña, V. O y Galván, L. M. (2010). Detección y atribución de cambio climático a escala regional. *Realidad, datos y espacio Revista internacional de estadística y geografía*, (1): 59-66 pp.
- Magaña, Víctor, et. al. "Evaluación de escenarios regionales de clima actual y de cambio climático futuro para México", en: *México: una visión hacia el siglo XXI. El cambio climático en México*. Distrito Federal, México, SEMARNAP, UNAM, U.S. Country Studies Program, 1999, pp. 11-17.
- Mann, H. B. (1945), "Non-parametric tests against trend", *Econometrica*, no. 13, pp. 245-259.
- Martínez, J. (2015) *ABC de Cambio Climático: Impactos y Acciones en México*. Instituto Nacional de ecología [diapositivas de PowerPoint]. Recuperado de: <http://es.scribd.com/doc/118774457/Impacto-Cambio-Climatico-en-Mexico#scribd>
- Méndez G, J., Ramírez L, A., Cornejo, E., Zárate, A., & Cavazos, T. (2010). Teleconexiones de la Oscilación Decadal del Pacífico (PDO) a la precipitación y temperatura en México. *Investigaciones geográficas*, (73), 57-70.

- Oyler, J. W., Dobrowski, S. Z., Ballantyne, A. P., Klene, A. E., & Running, S. W. (2015). Artificial amplification of warming trends across the mountains of the western United States. *Geophysical Research Letters*.
- Peterson, T. C., Zhang, X., Brunet-India, M., & Vázquez-Aguirre, J. L. (2008). Changes in North American extremes derived from daily weather data. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres (1984–2012)*, 113 (D7).
- Ren, G., & Zhou, Y. (2014). Urbanization effect on trends of extreme temperature indices of national stations over Mainland China, 1961–2008. *Journal of Climate*, 27(6), 2340-2360.
- Santana, A. Butorovic, N. y Olave, C. (2009). Variación de la temperatura en Punta Arenas (Chile) en los últimos 120 años. *Anales del Instituto de la Patagonia*, 37 (1):85-96.
- Sen, P. K. (1968). Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. *Journal of American Statistical Association*, 63 (324), 1379-1389.
- Shrestha, A. B., Wake, C. P., Mayewski, P. A., & Dibb, J. E. (1999). Maximum temperature trends in the Himalaya and its vicinity: An analysis based on temperature records from Nepal for the period 1971-94. *Journal of climate*, 12 (9), 2775-2786.
- Trenberth, K. E., P. D. Jones, P. Ambenje, R. Bojariu, D. R. Easterling, A. Kleint-Tank, D. Parker, F. Rahimzadeh, J. A. Renwick, M. Rusticucci, B. Soden, and P. Zhai, (2007). Observations: Surface and Atmospheric Climate Change. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of WG I to*

the Fourth Assessment Report of the IPCC., S. e. al., Ed., Cambridge University Press.

Vázquez, J.L. 2010: Guía para el cálculo y uso de índices de cambio climático en México, 88 pp.

Villers Ruiz, Lourdes e Irma Trejo Vázquez. “El cambio climático y la vegetación en México”, en: *México: una visión hacia el siglo XXI. El cambio climático en México*. SEMARNAP, UNAM, U.S. Country Studies Program, 1999. p. 69.

Viola, F., Liuzzo, L., Noto, L. V., Lo Conti, F., & La Loggia, G. (2014). Spatial distribution of temperature trends in Sicily. *International Journal of Climatology*, 34 (1), 1-17.

Xia, F., Liu, X., Xu, J., Wang, Z., Huang, J., & Brookes, P. C. (2015). Trends in the daily and extreme temperatures in the Qiantang River basin, China. *International Journal of Climatology*, 35(1), 57-68.

Zhang, L., Ren, G. Y., Ren, Y. Y., Zhang, A. Y., Chu, Z. Y., & Zhou, Y. Q. (2014). Effect of data homogenization on estimate of temperature trend: a case of Huairou station in Beijing Municipality. *Theoretical and Applied Climatology*, 115 (3-4), 365-373.