

Trend of cold hours in the northwest of the State of Mexico

Georgina Pérez Rodríguez*

Abstract

Climate change is one of the main problems facing agriculture because of the alterations it causes in the agroclimate. There has been an increment in temperature in Mexico, which has caused changes in agroclimatic variables, such as cold hours (CH) in the winter period. The characterization of the accumulation of CH is important for making decisions about the species that can be grown, since it allows minimizing risks in the production of deciduous fruit trees. The climate change trend for Mexico indicates a general increase in maximum temperature. The objective of this research was to analyze the trend of CH in the northwestern zone of the State of Mexico, from 1985 to 2020 and two future scenarios: to 2041. The results indicate that the areas of highest CH accumulation extended from the center to the north of the zone until the winter period 2015-2016, following this trend in both scenarios until the year 2041. Furthermore, that the areas of greatest accumulation will be found in small areas in four municipalities: Atlacomulco, San Felipe del Progreso, Jocotitlán and Jiquipilco. Also, the average temperature of the area will increase by 1.6 °C, with higher temperatures recorded in Acambay and Temascalcingo.

Keywords: Cold hours, climatic variables, climatic scenarios, temperature

Tendencia de las horas frío en el noroeste del Estado de México

Resumen

El cambio climático representa uno de los principales problemas que enfrenta la agricultura debido a las alteraciones que causa en el agroclima. La temperatura en México se ha incrementado, provocando modificaciones en variables agroclimáticas, como las horas frío (HF) en el periodo invernal. La caracterización de la acumulación de HF es importante para tomar decisiones sobre las especies que se pueden cultivar, ya que permite minimizar riesgos en la producción de frutales caducifolios. La tendencia del cambio climático para México, indica un incremento general en la temperatura máxima. El objetivo de la presente investigación fue analizar la tendencia de las HF en la zona noroeste del Estado de México, de 1985 al año 2020 y dos escenarios futuros: al año 2041. Los resultados indican que las zonas de mayor acumulación de HF se extendieron del centro al norte de la zona hasta el período invernal 2015-2016, siguiendo dicha tendencia en ambos escenarios hasta el año 2041. Además, que las áreas de mayor acumulación se encontrarán en pequeños manchones en cuatro municipios: Atlacomulco, San Felipe del Progreso, Jocotitlán y Jiquipilco. Así como, que la temperatura media del área aumentará en 1.6 °C, con registro de temperaturas más altas en Acambay y Temascalcingo.

Palabras clave: Horas frío, variación climática, escenarios climáticos, temperatura.

Colegio de Postgraduados, Posgrado de Hidrociencias y Edafología, Campus Montecillo, carretera México-Texcoco, km 36.5, Montecillo, Texcoco, Estado de México.

*Corresponding author: perez.georgina@colpos.mx Tel: 712 2349780, ORCID ID: 0000-0002-7194-8750

Received: May 10, 2022

Accepted: October 30, 2024

Introduction

Many changes have been observed in the global climate over the last century. Currently, climate change represents one of the main problems facing agriculture, due to the alterations it causes in climate patterns, due to the increase in the atmospheric concentration of greenhouse gases (GHG) (IPCC, 2021). This phenomenon is aggravated by anthropogenic activities and the modification of the natural environment; these climatic alterations have intensified in recent decades (Boru et al., 2019).

The temperature in Mexico has been increasing significantly since the nineties of the last century (Ruiz et al., 2010; Zarazúa et al., 2011a), this increase brings with it modifications in agroclimatic variables (Zarazúa et al., 2011b), such as the accumulation of cold in the winter period (Medina-García et al., 2011; Santillán et al., 2011).

Knowledge of the accumulation of cold hours in a given area is very important when making decisions about the varieties of each species that can be grown, assuming minimal risks (Espada, 2010).

Richardson et al. (1974) define chilling hours as the number of cold hours, less than or equal to 7 °C, during the winter which are necessary to restore bud growth potential in spring. Plant species, as well as horticultural varieties, vary widely in their cold hour requirements (Vinson, 2018).

Since it was determined that the average temperature of the Earth's surface increased, on average, by 0.5°C from 1880 to 1980, attempts have been made to forecast the increase in temperatures and climate behavior in general. Atmospheric sciences have developed knowledge and analysis tools such as general circulation models (GCMs), which simulate global atmospheric dynamics and estimate possible climate changes in future decades through illustrative scenarios of greenhouse gas (GHG) emissions, land use and atmospheric pollutants (IPCC, 2021).

Illustrative scenarios vary depending on socioeconomic assumptions, climate change mitigation levels and, in the case of aerosols and non-methane ozone precursors, air pollution controls, are represented as SSP1-1.9 and SSP1-2.6 (very low and low emissions), SSP2-4.5 (intermediate emissions) and SSP3-7.0 and SSP5-8.5 (high and very high emissions) for different periods: short term (2021-2040), medium

Introducción

El clima determina las zonas apropiadas para la agricultura, desde el enfoque del desarrollo de los cultivos, luz, temperatura y humedad son los tres componentes más importantes, que a su vez condicionan la luminosidad, el fotoperiodo, la fotosíntesis y la evapotranspiración (Hargreaves, 1981; Velasco & Pimentel, 2010; Perdomo-López, 2015; Mendoza-Cariño et al., 2023).

Muchos cambios se han observado en el clima global durante el siglo pasado. Actualmente, el cambio climático representa uno de los principales problemas que enfrenta la agricultura, debido a las alteraciones que causa en los patrones del clima, por el incremento en la concentración atmosférica de los gases efecto invernadero (GEI) (IPCC, 2021). Este fenómeno se agrava a partir de las actividades antropogénicas y la modificación del entorno natural; dichas alteraciones climáticas, se han intensificado en las últimas décadas (Boru et al., 2019).

La temperatura en México se ha venido incrementando de manera perceptible desde los años noventa del siglo pasado (Ruiz et al., 2010; Zarazúa et al., 2011a), este incremento trae consigo modificaciones en variables agroclimáticas (Zarazúa et al., 2011b), como puede ser la acumulación de frío en el periodo invernal (Medina-García et al., 2011; Santillán et al., 2011).

El conocimiento de la acumulación de horas frío en un área determinada es muy importante a la hora de tomar decisiones sobre las variedades de cada especie que se pueden cultivar, asumiendo riesgos mínimos (Espada, 2010).

Richardson et al. (1974) definen las horas frío como el número de horas de frío, menores o iguales a 7 °C, durante la temporada de invierno, que son necesarias para restablecer el potencial de crecimiento de las yemas en primavera. Las especies de plantas, así como las variedades hortícolas, varían ampliamente en sus requerimientos de horas frío (Vinson, 2018).

A partir de que se determinó que la temperatura media de la superficie terrestre aumentó, en promedio, 0.5 °C de 1880 a 1980, se ha tratado de pronosticar el aumento de temperaturas y del comportamiento climático en general. Las ciencias atmosféricas han desarrollado conocimientos y herramientas de análisis como los modelos de circulación general (MCG), los cuales simulan la dinámica atmosférica global y esti-

term (2041-2060) and long term (2081-2100) relative to the period 1850-1900 (IPCC, 2021).

These models can address the problem of uncertainty in estimating the impacts of climate change on agroclimatic conditions (Tian et al., 2014) in different parts of the world, especially in grain and fruit growing areas such as the northwestern part of the State of Mexico.

The climate change trend for Mexico indicates a general increase in maximum temperature and a decrease in precipitation, showing a greater warming in temperature for the present century and projecting increases of more than 5 °C in some regions of the center of the country (Mateos et al., 2015).

Based on the above, it is important to investigate the regional and seasonal nature of climate change in Mexico, especially to quantify the types and levels of climate change that the different agricultural regions of the country have been experiencing.

Methodological Approach

Study area

The proposed area for the present study is located in the northwest of the State of México, including six municipalities: San Felipe del Progreso, Ixtlahuaca, Jocotitlán, Jiquipilco, Atlacomulco, Temascalcingo and Acambay (INEGI, 2021) (Figure 1).

The predominant climate in the region is temperate, sub-humid with summer rainfall (Cw), the average annual temperature is 13.2 °C with a maximum of 24 °C and a minimum of 0 °C, the average annual precipitation is 750 mm (INAFED, 2018; Mitre et al., 2014). According to the edaphological Series II (INEGI, 2014), nine main soil groups are present; among the predominant soil types are Phaeozem and Planosol, with approximately 57 % of the area's surface, whose characteristics make them suitable for the development of agriculture, livestock and logging.

The area of interest is located in Hydrological Region 12 (RH12) (Birrichaga & Salinas, 2016). The hydrographic regions are the Pánuco and the Lerma-Chapala-Santiago rivers; the sub-basins of the first one are formed by the Prieto and Blanco rivers and of the second one, those of the Alto Lerma. The Lerma basin is mainly characterized by being located in one of the largest agricultural production areas and, on

man los posibles cambios del clima en las décadas futuras, mediante escenarios ilustrativos de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), usos de la tierra y contaminantes atmosféricos (IPCC, 2021).

Los escenarios ilustrativos varían en función de los supuestos socioeconómicos, los niveles de mitigación del cambio climático y, en el caso de los aerosoles y los precursores del ozono distintos del metano, los controles de la contaminación atmosférica, se representan como SSP1-1.9 y SSP1-2.6 (emisiones muy bajas y bajas), SSP2-4.5 (emisiones intermedias) y SSP3-7.0 y SSP5-8.5 (emisiones altas y muy altas) para diferentes períodos: corto plazo (2021–2040), medio plazo (2041–2060) y largo plazo (2081–2100) en relación con el período 1850–1900 (IPCC, 2021).

Con dichos modelos se puede abordar el problema de la incertidumbre en la estimación de los impactos del cambio climático en las condiciones agroclimáticas (Tian et al., 2014) de diferentes partes del mundo, en especial de zonas productoras de granos y frutales como lo es la zona noroeste del Estado de México.

La tendencia de cambio climático para México, indica un incremento general en temperatura máxima y una disminución en precipitación, pronunciando cambios de mayor calentamiento en la temperatura para el presente siglo y proyectando aumentos superiores a los 5 °C en algunas regiones del centro del país (Mateos et al., 2015).

Con base en lo anterior, es importante investigar en relación con el carácter regional y estacional del cambio climático en México, sobre todo, para cuantificar los tipos y niveles de modificación climática, que han estado experimentando las diferentes regiones agropecuarias del país.

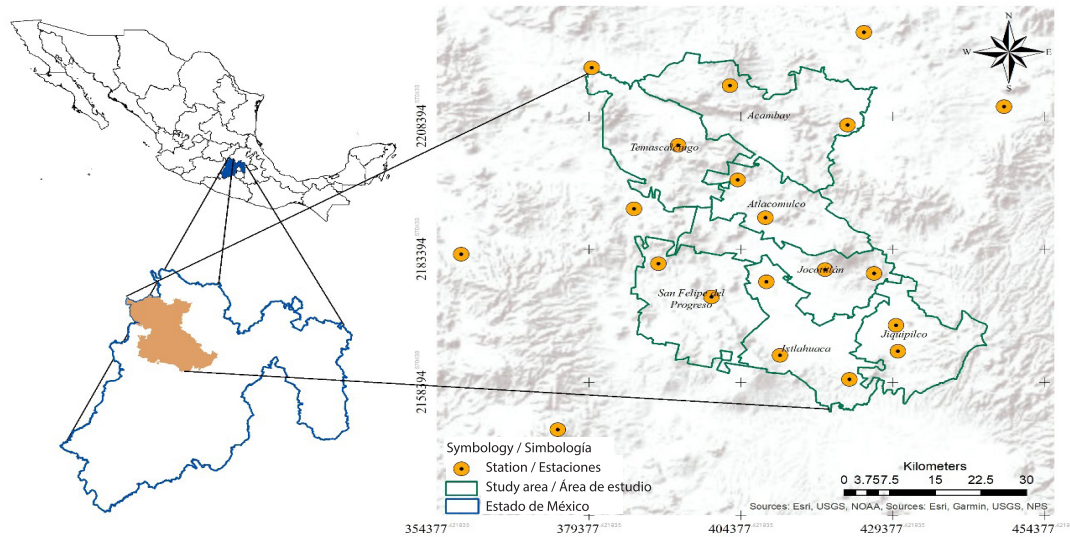
Enfoque Metodológico

Área de estudio

El área propuesta para el presente estudio está ubicada al noroeste del Estado de México, comprende seis municipios: San Felipe del Progreso, Ixtlahuaca, Jocotitlán, Jiquipilco, Atlacomulco, Temascalcingo y Acambay (INEGI, 2021) (Figura 1).

El clima que predomina en la región es templado, subhúmedo con lluvias en verano (Cw), la temperatura media anual es de 13.2 °C con una máxima de 24 °C y una mínima de 0 °C, la precipitación promedio

Figure 1. Location of the study area and the climatological stations used in the analysis of cold hours.
Figura 1. Ubicación del área de estudio y de las estaciones climatológicas utilizadas en el análisis de las horas frío.



Fuente: Elaboración propia con capas vectoriales de INEGI (2021a, 2021b) y CONAGUA (2024).
Source: Self-made, based on vector layers from INEGI (2021a, 2021b) and CONAGUA (2024).

the other hand, in the industrial zone of Atzacmulco.

Methodology

The information of the climatological stations was obtained from the national climatological data base of CONAGUA, (2024). Twenty stations were selected with data from 1985 to 2020. The considered variables were maximum and minimum temperature (T), with the daily data of these variables the hourly temperature (T_H) was generated, and from it the number of hours with $T < 7\text{ }^\circ\text{C}$ was counted to generate the daily, monthly and total cold hours (CH). The T_H was obtained by the exponential method proposed by Tejeda-Martínez (1991), for its application in Mexico, which uses the following formula:

$$T_H = T_{MIN} + y (T_{MAX} - T_{MIN})$$

where:

T_H = Hourly temperature;

T_{MAX} = Maximum daytime temperature;

T_{MIN} = Minimum daytime temperature;

y = Exponential function of adjustment calculated as:

anual es de 750 mm (INAFED, 2018; Mitre et al., 2014). De acuerdo con la Serie II edafológica (INEGI, 2014), están presentes nueve grupos principales de suelo; entre los tipos de suelos que predominan están el Phaeozem y el Planosol, con aproximadamente el 57 % de la superficie del área, cuyas características los vuelven aptos para el desarrollo de la agricultura, ganadería y explotación forestal.

La zona de interés se ubica en la Región Hidrológica 12 (RH12) (Birrichaga & Salinas, 2016). Las regiones hidrográficas son el río Pánuco y el Lerma-Chapala-Santiago; las subcuencas del primero las conforman los ríos Prieto y Blanco y del segundo, las del Alto Lerma. La cuenca del Lerma se caracteriza principalmente por ubicarse, en una de las mayores zonas productoras agropecuarias y, por el otro, en la zona industrial de Atzacmulco.

Metodología

Se dispuso de información de estaciones climatológicas de la base de datos climatológica nacional de CONAGUA, (2024). Se seleccionaron veinte estaciones con datos de 1985 a 2020. Las variables consi-

$$y = at^b \exp(ct)$$

where t is a linear function of time. The value of y has the following characteristics:

$$y = 0 \text{ when } T_H = T_{MIN}$$

$$y = 1 \text{ when } T_H = T_{MAX}$$

$$y = 1/2 \text{ when } T_H = (T_{MAX} + T_{MIN}) / 2, \text{ when it occurs in the morning, and;}$$

$$y = 1/2 \text{ when } T_H = T_{MEDIA} \text{ in the afternoon.}$$

The value of t cannot be negative, it is a function of local time (H), the local sunrise time is symbolized as H_0 and t is determined as follows:

$$t = H - H_0, \text{ si } H \geq H_0$$

$$t = H + 24 - H_0, \text{ si } H < H_0$$

In addition, Tejeda-Martínez (1991) calculated the values of constants a , b and c for Mexico (Table 1), in this case the values of the constants from January to December were used due to the latitude of the study area.

Subsequently, the number of CH for each of the months of the winter period (November, December, January and February) for each decade of the 36-year record considered at each station was summed to obtain the total CH value. Fifteen stations plus five external stations were selected for the CH trend analysis (Table 2).

The geographic information system Arcmap ver-

deradas fueron temperatura (T) máxima y mínima, con los datos diarios de dichas variables, se generó la temperatura horaria (T_H), y a partir de ella, se contó el número de horas con $T < 7^\circ\text{C}$ para generar las horas frío (HF) diarias, mensuales y totales. La T_H se obtuvo por el método exponencial propuesto por Tejeda-Martínez (1991), para su aplicación en México, que emplea la siguiente fórmula:

$$T_H = T_{MIN} + y (T_{MAX} - T_{MIN})$$

donde:

T_H = Temperatura horaria;

T_{MAX} = Temperatura máxima del día;

T_{MIN} = Temperatura mínima del día;

y = Función exponencial de ajuste calculada como:

$$y = at^b \exp(ct)$$

siendo t una función lineal del tiempo. El valor de y tiene las siguientes características:

$$y = 0 \text{ cuando la } T_H = T_{MIN};$$

$$y = 1 \text{ cuando la } T_H = T_{MAX};$$

$$y = 1/2 \text{ cuando la } T_H = (T_{MAX} + T_{MIN}) / 2, \text{ cuando ocurre por la mañana, y;}$$

$$y = 1/2 \text{ cuando la } T_H = T_{MEDIA} \text{ en la tarde.}$$

El valor de t no puede ser negativo, es una función del tiempo local (H), la hora local de salida del sol se simboliza como H_0 y la t se determina como sigue:

Table 1. Values of constants a , b and c for Mexico using the exponential method.
Cuadro 1. Valores de las constantes a , b y c para México con el método exponencial.

Months /Meses	Latitude / Latitud	Values / Valores		
		a	b	c
March to October / Marzo a octubre	$\geq 23.5^\circ \text{ N}$	0.026	3.190	-0.375
November to February / Noviembre a febrero	$\geq 23.5^\circ \text{ N}$	0.023	3.436	-0.421
January to December / Enero a diciembre	$< 23.5^\circ \text{ N}$	0.096	2.422	-0.339

Source / Fuente: Tejeda-Martínez (1991).

sion 10.5 (ArcGIS ESRI, Redlands, California, United States) was used for the spatial analysis of total CH. An interpolation was performed with the records of twenty stations with the IDW (Inverse Distance Weighted) interpolator and the results were represented by maps.

To estimate the effect of climate change on the number of CHs, the HadGEM3-6C31-LL general circulation model (GCM) from the LARS WG6.0 climate software was used. The model was developed under two shared socioeconomic trajectories (SSPP2-4.5 and SSP5-8.5) for the short term (2021-2041) which is consistent with a future with no policy changes to reduce emissions (Van et al., 2011). Maximum and minimum temperature data from the mentioned stations were required. With the obtained scenarios, the same procedure was performed to obtain

$$t = H - Ho, \text{ si } H \geq Ho$$

$$t = H + 24 - Ho, \text{ si } H < Ho$$

Además, Tejeda-Martínez (1991) calculó los valores de las constantes *a*, *b* y *c* para México (Cuadro 1), en este caso se emplearon los valores de las constantes de enero a diciembre por la latitud del área de estudio.

Posteriormente, se sumó el número de HF para cada uno de los meses del período invernal (noviembre, diciembre, enero y febrero) para cada década del registro de 36 años considerado en cada estación, para obtener el valor de HF totales. Para el análisis de tendencias de HF se seleccionaron quince estaciones más cinco estaciones externas (Cuadro 2).

Para el análisis espacial de las HF totales se utilizó el sistema de información geográfica Arcmap versión 10.5 (ArcGIS ESRI, Redlands, California, Estados Uni-

Table 2. General description of the climatological stations.
Cuadro 2. Descripción general de las estaciones climatológicas.

Station / Estación	Key / Clave	Latitude / Latitud	Length / Longitud	Altitude (masl) / Altitud (msnm)
Mataxhi	37	20.113	-99.721	2514
Ejido de Llano Grande	15025	19.572	-99.665	2538
Enyeje	15026	19.564	-99.850	2550
El Tejocote	15029	19.862	-99.918	2449
Tepetitlán Dam	15076	19.663	-99.958	2564
San Bartolo del Llano	15085	19.524	-99.741	2587
Santiago Yeché	15112	19.704	-99.703	2696
Temascalcingo	15117	19.920	-100.012	2377
Tultenango	15128	19.812	-100.081	2601
Cuesta del Carmen	15197	19.436	-100.198	2750
Muyteje	15244	20.022	-99.931	2840
Atlacomulco II	15251	19.798	-99.874	2574
Buenos Aires	15264	19.616	-99.668	2576
Chichilpa	15267	19.719	-100.042	2795
San Cristobal de los Baños	15308	19.689	-99.872	2570
Pozo ocho	15361	19.956	-99.746	2626
Jocotitlán	15390	19.710	-99.780	2650
Senguio	16121	19.733	-100.352	2260
Temascales	16124	20.051	-100.149	2409
San Antonio	48022	19.988	-99.499	2405

Source / Fuente: CONAGUA (2024).

the CHs of the twenty stations, as well as interpolation and representation in maps.

Results and Discussion

Trends from 1985 - 2020

The CH analysis of the twenty stations was performed for five winter periods: 1985-1986, 1995-1996, 2005-2006, 2015-2016 and 2019-2020. Table 3 shows the statistics of the analyzed stations.

Using the number of CH of each station it was possible to perform an interpolation with IDW (Inverse Distance Weighting), Figure 2 shows its behavior for the five winter periods analyzed. It was observed that the first period presented a range from 497 to 1 279 CH; the other four periods showed a wider range of cold hours.

The historical trend shows that, over time, the zones with more than 1,000 CH, presented in more than half of the area, changed their distribution, tending towards the center and south of the study area during the third winter period. During the fourth period, they were reduced to two small zones; to the east of the municipality of Jocotitlán and the center of San Felipe del Progreso. In the fifth winter period, there was a noticeable change in the zones with the greatest accumulation of CH, located east of Acambay, in the southeast of Ixtlahuaca.

Zones with less than 400 CH were identified from the third winter period, predominantly in the municipality of Temascalcingo; by the fourth and fifth

dos). Se realizó una interpolación con los registros de doce estaciones con el interpolador IDW (Distancia Inversa Ponderada) y se representaron los resultados mediante mapas.

Para estimar el efecto del cambio climático en el número de HF se utilizó el modelo de circulación general (MCG) HadGEM3-6C31-LL a partir del software climático LARS WG6.0. El modelo se desarrolló bajo dos trayectorias socioeconómicas compartidas (SSPP2-4.5 y SSP5-8.5) para el corto plazo (2021-2041) que es coherente con un futuro sin cambios de política para reducir las emisiones (Van et al., 2011). Se requirieron datos de temperatura máxima y mínima de las estaciones mencionadas. Con los escenarios obtenidos se realizó el mismo procedimiento para obtener las HF de las veinte estaciones, así como la interpolación y la representación en mapas.

Resultados y Discusión

Tendencias de 1985 - 2020

El análisis de HF de las veinte estaciones se realizó para cinco periodos invernales: 1985-1986, 1995-1996, 2005-2006, 2015-2016 y 2019-2020. El Cuadro 3 muestra los estadísticos de las estaciones analizadas.

Mediante el número de HF de cada estación fue posible realizar una interpolación con IDW (Ponderación de distancia inversa), la Figura 2 muestra su comportamiento para los cinco periodos invernales analizados. Se observó que el primer periodo presentó

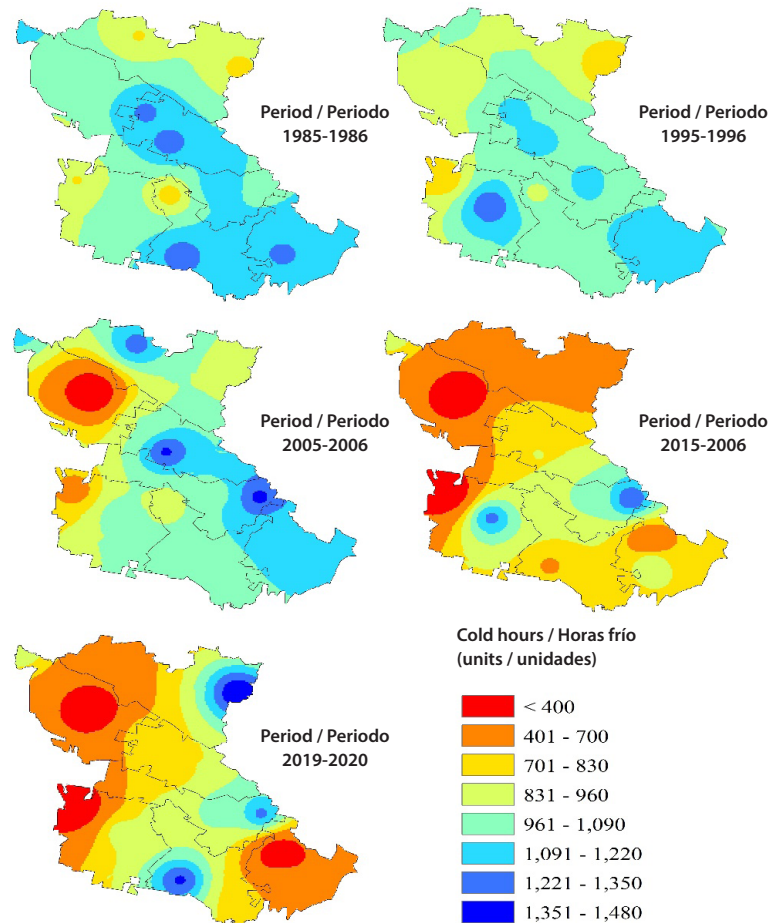
Table 3. Statistics of the winter periods analyzed.
Cuadro 3. Estadísticos de los periodos invernales analizados.

Statistic / Estadístico	Winter period / Período invernal				
	1985-1986	1995-1996	2005-2006	2015-2016	2019-2020
Media / Media	987.5	900.3	935.6	681.7	690.9
Median / Mediana	1 013.0	996.0	968.0	698.5	727.5
Maximum / Máximo	1 279.0	1 342.0	1 376.0	1 328.0	1 467.0
Minimum / Mínimo	497.0	53.0	12.0	8.0	12.0
Standard deviation / Desviación estándar	233.8	319.7	303.2	333.0	403.9
Variance / Varianza	54 656.1	102 234.9	91 903.6	110 915.8	163 174.6

Source: Self-made.

Fuente: Elaboración propia.

Figure 2. Interpolation of CH for five winter periods from 1985 to 2020.
Figura 2. Interpolación de las HF para cinco períodos invernales de 1985 al año 2020.



Source: Self-made.
Fuente: Elaboración propia.

periods, these areas were extended to the municipalities of San Felipe del Progreso and Jiquipilco, respectively.

In the five winter periods analyzed, it is observable that climatic variability has been evident in the northwestern part of the State of Mexico, since the distribution of the CH has been changing over time (Figure 3).

Projections for 2021-2041

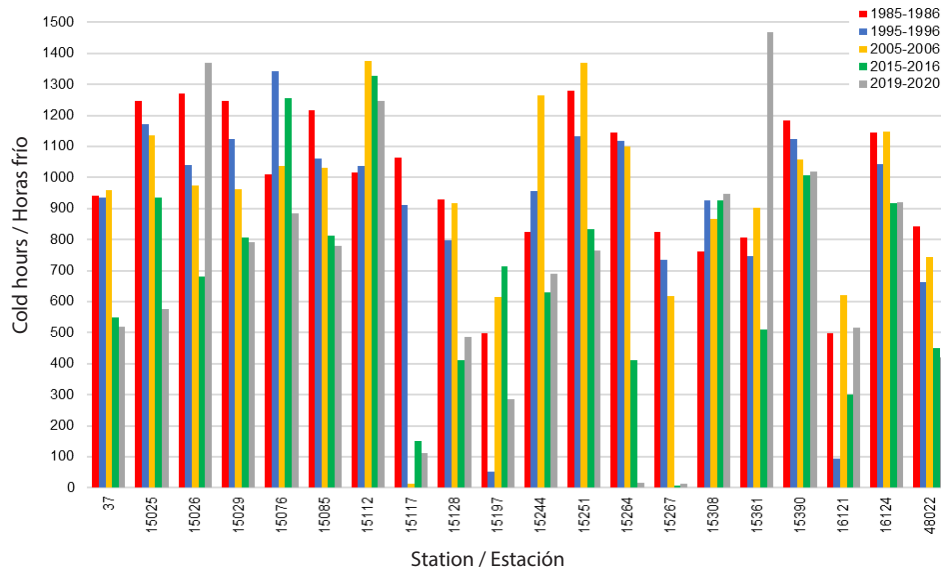
Two shared socioeconomic trajectories SSP2-4.5 and SSP5-8.5 (IPCC, 2021) that consider possible future developments with respect to intermediate and very high greenhouse gas (GHG) emissions, respectively, were considered.

un rango de 497 a 1 279 HF; los otros cuatro períodos mostraron un rango más amplio de horas frío.

La tendencia histórica muestra que, a través del tiempo, las zonas con más de 1 000 HF, presentes en más de la mitad del área, cambiaron su distribución, tendiendo hacia el centro y sur del área de estudio durante el tercer período invernal. Mientras en el cuarto período se redujeron a dos pequeñas zonas; al este del municipio de Jocotitlán y el centro de San Felipe del Progreso. En el quinto período invernal fue notorio el cambio de las zonas con mayor acumulación de HF, presentes al este de Acambay, en el sureste de Ixtlahuaca.

Se identificaron zonas con menos de 400 HF a partir del tercer período invernal, principalmente en el municipio de Temascalcingo, para el cuarto y quinto pe-

Figure 3. Historical behavior of CH in the northwestern zone of the State of Mexico.
Figura 3. Comportamiento histórico de las HF en la zona noroeste del Estado de México.



Source: Self-made.

Fuente: Elaboración propia.

Projection using SSP2-4.5

The statistics of the scenario (SSP2-4.5), generated with the general circulation model (GCM) Had-GEM3-6C31-LL projected in the short term (2021-2041) for the twenty stations are presented in Table 4.

As a first observation, it is determined that for the period 2021-2041, the minimum accumulated CH will be 297, while the maximum will be 1 120 CH. In addition, the number of CH would decrease for the second winter period, but would increase again in the third period.

In the SSP2-4.5 scenario of CH, by means of interpolation with IDW, it can be observed that the areas with the greatest accumulation of CH will be in four municipalities: center-south of Atlacomulco, east of Jocotitlán, center of San Felipe del Progreso and center of Jiquipilco.

For the second and third periods, a decrease in these areas (> 988 HF) is observed in the last two municipalities mentioned (Figure 4). The trend of greater accumulation will be during the third winter period with a range of 514 to 1 120 CH.

Regarding the areas with lower accumulation of CH, it is shown that they will be in the center of Temascalcingo and east of Acambay, in the first two winter periods. During the third period, only areas

ródo, dichas zonas se extendieron a los municipios de San Felipe del Progreso y Jiquipilco, respectivamente.

En los cinco períodos invernales analizados, es observable que la variabilidad climática se ha hecho presente en la zona noroeste del Estado de México, ya que la distribución de las HF ha ido cambiando a través del tiempo (Figura 3).

Proyecciones para 2021-2041

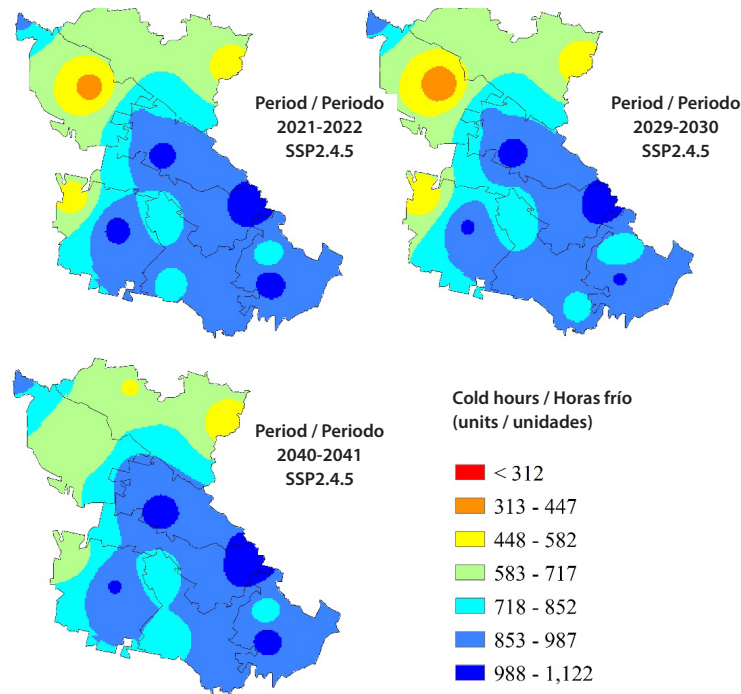
Se consideraron dos trayectorias socioeconómicas compartidas SSP2-4.5 y SSP5-8.5 (IPCC, 2021) que consideran las posibles evoluciones futuras respecto a emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) intermedias y muy altas, respectivamente.

Proyección mediante el SSP2-4.5

Los estadísticos del escenario (SSP2-4.5), generado con el modelo de circulación general (MCG) Had-GEM3-6C31-LL proyectado a corto plazo (2021-2041) para las veinte estaciones se presenta en el Cuadro 4.

Como primera observación, se determina que para el período 2021-2041, el mínimo de HF acumuladas serán 297, mientras que el máximo será de 1 120 HF. Además, que el número de HF disminuirá para el segundo período invernal, pero volverá a aumentar en el tercer período.

Figure 4. SSP2-4.5 projection of CHs in northwestern Mexico State.
Figura 4. Proyección SSP2-4.5 de las HF en el noroeste del Estado de México.



Source: Self-made.
Fuente: Elaboración propia.

Table 4. Statistics of the SSP2-4.5 scenario for 2021-2041.
Cuadro 4. Estadísticos del escenario SSP2-4.5 para 2021-2041.

Statistic / Estadístico	Winter period / Periodo invernal		
	2021-2022	2029-2030	2040-2041
Media	741.8	725.9	755.5
Median / Mediana	756.5	731.5	758.5
Maximum / Máximo	1 074.0	1 103.0	1 120.0
Minimum / Mínimo	352.0	297.0	340.0
Standard deviation / Desviación estándar	235.0	240.2	228.9
Variance / Varianza	55 214.0	57 686.1	52 406.5

Source: Self-made.
Fuente: Elaboración propia.

with more than 448 CH are observed east of Acambay, which indicates that the temperature in these areas will decrease. It is likely that, in the next 20 years, climate variability will become visible by modifying the zones where CH accumulate in the northwest of the State of Mexico (Figure 5).

Projection using SSP5-8.5

En el escenario SSP2-4.5 de las HF, mediante la interpolación con IDW, se puede observar que las zonas de mayor acumulación de HF se presentarán en cuatro municipios: centro-sur de Atlacomulco, este de Jocotitlán, centro de San Felipe del Progreso y centro de Jiquipilco.

Para el segundo y tercer período se observa la disminución de dichas zonas (> 988 HF) en los últi-

Considering the highest shared socioeconomic trajectory (SSP5-8.5) and using the general circulation model (GCM) HadGEM3-6C31-LL projected for 2021-2041, for the twenty stations, it is observed that the minimum accumulated CH will be around 300 units, while the maximum will be 1,083 CH. In general, the CH will increase in the third winter period (Table 5). This behavior is similar to that of SSP2-4.5, but with less accumulated CH.

When interpolating the SSP5-8.5 CH scenario, it can be observed that the areas of higher CH accumulation were reduced, compared to SSP2-4.5, occurring in the center and southeast of the study area (Figure 6).

Atlaconulco (center and south of the municipality) and east of Jocotitlán are the areas where the greatest amount of CH will be concentrated from 2021 to 2041. Although a decreasing trend of CH is shown for the second period, in the third period it increases again (Figure 6). The highest accumulation trend will be during the third winter period with a range of 400 to 1,083 CH (Figure 7).

The areas with the lowest accumulation of CH will be in the center of Temascalcingo, north of San Feli-

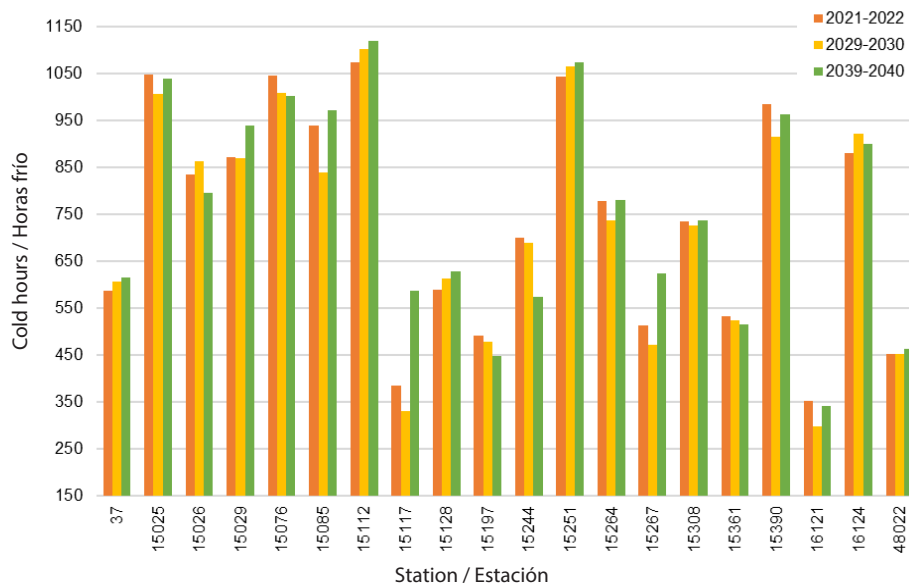
mos dos municipios mencionados (Figura 4). La tendencia de mayor acumulación será durante el tercer período invernal con un rango de 514 a 1 120 HF.

Respecto a las zonas con menor acumulación de HF, se muestra que se presentarán en el centro de Temascalcingo y este de Acambay, en los primeros dos períodos invernales. Mientras que durante el tercer período se observan solo zonas de más de 448 HF al este de Acambay, lo que indica que disminuirá la temperatura en dichas zonas. Es probable que, en los próximos 20 años, la variabilidad climática se hará visible mediante la modificación de las zonas donde se acumulen las HF en el noroeste del Estado de México (Figura 5).

Proyección mediante el SSP5-8.5

Considerando la trayectoria socioeconómica compartida más alta (SSP5-8.5) y empleando el modelo de circulación general (MCG) HadGEM3-6C31-LL proyectado para 2021-2041, para las veinte estaciones, se observa que el mínimo de HF acumuladas rondará las 300 unidades, mientras que el máximo será de 1 083 HF. De manera general las HF aumentarán en el tercer período invernal (Cuadro 5). Dicho comporta-

Figure 5. Future behavior of CH in the northwestern zone of the State of Mexico.
Figura 5. Comportamiento futuro de las HF en la zona noroeste del Estado de México.



Source: Self-made.

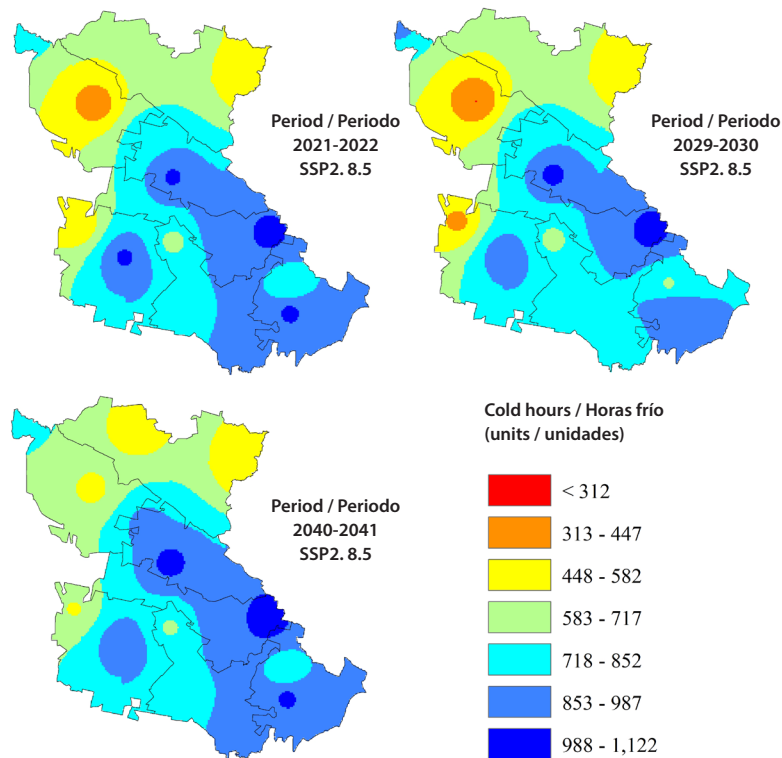
Fuente: Elaboración propia.

Table 5. Statistics for the SSP5-8.5 scenario for 2021-2041.
Cuadro 5. Estadísticos del escenario SSP5-8.5 para 2021-2041.

Statistic / Estadístico	Winter period / Periodo invernal		
	2021-2022	2029-2030	2040-2041
Media	698.3	684.5	713.4
Median / Mediana	704.0	690.0	720.5
Maximum / Máximo	1 039.0	1,065.0	1 084.0
Minimum / Mínimo	314.0	271.0	299.0
Standard deviation / Desviación estándar	239.9	243.2	234.0
Variance / Varianza	57 559.6	59 164.9	54 775.7

Source: Self-made.
Fuente: Elaboración propia.

Figure 6. SSP5-8.5 projection of CHs in northwestern Mexico State.
Figura 6. Proyección SSP5-8.5 de las HF en el noroeste del Estado de México.



Source: Self-made.
Fuente: Elaboración propia.

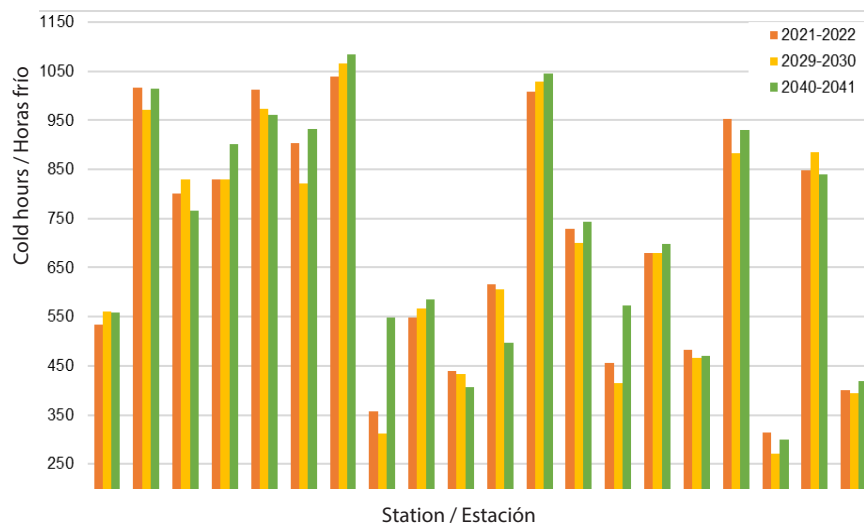
pe del Progreso and east of Acambay, in the first two winter periods. For the third period, the temperature will increase and there will be only areas with more than 448 CH in the three municipalities.

It is important to indicate that the average tem-

miento es similar al de la SSP2-4.5, pero con menos HF acumuladas.

Al interpolar el escenario SSP5-8.5 de las HF, se puede observar que las zonas de mayor acumulación de HF se redujeron, en comparación con el SSP2-4.5,

Figure 7. Future behavior of CH in the northwestern zone of the State of Mexico.
Figura 7. Comportamiento futuro de las HF en la zona noroeste del Estado de México.



Source: Self-made.

Fuente: Elaboración propia.

peratures of the five historical periods were 11.2 °, 11.7 °, 11.6 °, 12.6 ° and 12.6 °C and the highest accumulation of CH, from 1985 to 2020, occurred in the month of January, while the average temperatures of the future winter periods will be 12.6 °, 12.7 ° and 12.6 °C (SSP2-4.5) and 12.7 °, 12.8 ° and 12.7 °C (SSP5-8.5) and the highest accumulation of CH from 2021 to 2041 will also occur in January. In the document "Mexico, fourth national communication to the United Nations Framework Convention on Climate Change" (INE, 2009), it is established that in the country for the period 2010 - 2030, the average annual temperature may vary from 0.5 ± 0.5 °C to 1.3 ± 0.8 °C, and for the period 2040 to 2060, it would vary from 1.3 ± 0.3 °C to 2.3 ± 1 °C (IPCC, 2021).

Global warming has the potential to reduce the available cold in winter, as demonstrated by Medina et al. (2011), who determined a reduction in the number of cold hours in the apple-growing region of the state of Chihuahua in Mexico. In addition, several studies such as Jindal & Mankotia (2004); Baldocchi & Wong (2008); Luedeling et al. (2009); Yu et al. (2010); Luedeling et al. (2011) have predicted the decrease in the accumulation of cold hours in several regions of the world, in future climate scenarios, using general circulation models or other methodologies.

presentándose al centro y sureste del área de estudio (Figura 6).

Atlacomulco (centro y sur del municipio) y este de Jocotitlán son las zonas donde se concentrará la mayor cantidad de HF de 2021 a 2041. Aunque se muestra una tendencia a la disminución de HF para el segundo período, en el tercero vuelve a aumentar (Figura 6). La tendencia de mayor acumulación será durante el tercer período invernal con un rango de 400 a 1 083 HF (Figura 7).

Las zonas con menor acumulación de HF se presentarán en el centro de Temascalcingo, norte de San Felipe del Progreso y este de Acambay, en los primeros dos períodos invernales. Para el tercer período, aumentará la temperatura y quedarán solo áreas con más de 448 HF en los tres municipios.

Es importante indicar que las temperaturas medias de los cinco períodos históricos fueron de 11.2 °, 11.7 °, 11.6 °, 12.6 ° y 12.6 °C y la mayor acumulación de HF, de 1985 al 2020, se presentó en el mes de enero, mientras que las temperaturas medias de los períodos invernales futuros serán de 12.6 °, 12.7 ° y 12.6 °C (SSP2-4.5) y 12.7 °, 12.8 ° y 12.7 °C (SSP5-8.5) y la mayor acumulación de HF de 2021 al 2041 también se presentará en el mes de enero. En el documento "México, cuarta comunicación nacional ante

IPCC (2021) notes that with each additional increment of global warming (0.5 °C), changes continue to become more pronounced, leading to clearly discernible increases in the intensity and frequency of extreme heat events, including heat waves and intense precipitation, as well as droughts in some regions, and that human-induced climate change is the main driving force behind these changes.

In recent years, in different parts of Mexico and the world, the presence of such extreme events has been noticeable, for example, more episodes of extreme heat and fewer episodes of intense cold.

Conclusions

An analysis of the CH for each of the months of the winter season from 1979 to 2000 was carried out with emphasis on five winter periods 1985-1986, 1995-1996, 2005-2006, 2015-2016 and 2019-2020 for twenty stations in the northwestern zone of the State of Mexico. In addition, two scenarios SSP2-4.5 and SSP5-8.5 were projected for the region.

Of the months that make up the winter period, for the historical record as well as for the projections, January is the month with the highest accumulation of CH.

Areas with high cold accumulation (more than 850 CH) presented a significant reduction since the fourth historical winter period (2015-2016), with this trend lasting in the two projected scenarios, where such areas were only found in small spots in four municipalities: Atlacomulco, San Felipe del Progreso, Jicotitlán and Jiquipilco.

The reduction in CH is mainly due to the increase in temperature. Based on this analysis, it is predicted that the average temperature will increase by an average of 1.6 °C and that the highest temperatures will occur in Acambay and Temascalcingo. Therefore, we can infer an unfavorable effect of global warming over the next 20 years, which will have an impact on the lack of cold hours in the winter, causing problems for crops that require a certain amount of cold hours for their growth and development.

End of English version

la convención marco de las naciones unidas sobre el cambio climático" (INE, 2009); se establece que en el país para el periodo 2010 - 2030, la temperatura media anual puede variar de 0.5 ± 0.5 °C a 1.3 ± 0.8 °C, y para el periodo 2040 a 2060, variaría de 1.3 ± 0.3 °C a 2.3 ± 1 °C (IPCC, 2021).

El calentamiento global tiene el potencial de reducir el frío disponible en el invierno, esto lo demostraron Medina et al. (2011), quienes determinaron una reducción de las horas frío en la región manzanera del estado de Chihuahua en México. Además, en diversos estudios como Jindal & Mankotia (2004); Baldocchi & Wong (2008); Luedeling et al. (2009); Yu et al. (2010); Luedeling et al. (2011) han pronosticado la disminución en la acumulación de horas frío en diversas regiones del mundo, en escenarios climáticos futuros, utilizando modelos de circulación general u otras metodologías.

El IPCC (2021) señala que con cada incremento adicional de calentamiento global (0,5 °C), los cambios siguen acentuándose, provocando aumentos claramente perceptibles en la intensidad y la frecuencia de los episodios de calor extremo, incluidas las olas de calor y las precipitaciones intensas, así como las sequías en algunas regiones, además, que el cambio climático inducido por el ser humano es la principal fuerza impulsora de estos cambios.

En los últimos años, en diferentes partes de México y del mundo, ha sido notoria la presencia de dichos eventos extremos como, por ejemplo, más episodios de calor extremo y menos episodios de frío intenso.

Conclusiones

Se logró realizar un análisis de las HF de cada uno de los meses de la temporada invernal de 1979 a 2000 con énfasis en cinco periodos invernales 1985-1986, 1995-1996, 2005-2006, 2015-2016 y 2019-2020 para veinte estaciones en la zona noroeste del Estado de México, además, se proyectaron dos escenarios SSP2-4.5 y SSP5-8.5 para la región.

De los meses que conforman el periodo invernal, para el registro histórico como para las proyecciones, enero es el mes con mayor acumulación de HF.

Las áreas con alta acumulación de frío (más de 850 HF) presentaron una fuerte reducción desde el cuarto periodo invernal histórico (2015-2016), continuan-

References / Referencias

- Baldocchi, D., & Wong, S. (2008). Accumulated winter chill is decreasing in the fruit growing regions of California. *Climatic Change*, 87(1), 153-166. <https://doi.org/10.1007/s10584-007-9367-8>.
- Birrichaga, G. D., & Salinas, S. M. del C. (Coords.) (2016). Cartografía hidráulica del Estado de México. El Colegio de Michoacán, A.C.; El Colegio Mexiquense, A.C.; Government of the State of Mexico. 350 p. <http://ri.uaemex.mx/bitstream/handle/20.500.11799/66246?sequence=3&isAllowed=y>.
- Boru, G. F., Gonfa, Z. B., & Diga, G. M. (2019). Impacts of climate change on stream flow and water availability in Anger sub-basin, Nile Basin of Ethiopia. *Sustainable Water Resources Management*, 5(4), 1755-1764. <https://doi.org/10.1007/s40899-019-00327-0>.
- CONAGUA, (2024). Climatological normals by state. Comisión Nacional del Agua. <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/informacion-climatologica/normales-climatologicas-por-estado>.
- Espada, C. J. L. (2010). Winter chilling requirements of deciduous fruit trees (244). Technical Information of the Department of Agriculture and Feeding of the Government of Aragon. https://bibliotecavirtual.aragon.es/i18n/catalogo_imagenes/grupo.cmd?path=3705385.
- Hargreaves, G. H. (1981). *Handbook for irrigation scheduling from limited climatic data*. International Irrigation Center, Utah State University. Logan, Utah, USA.
- INAFED, (2018). Encyclopedia of the Municipalities and Delegations of Mexico. 02/04/2019, from Instituto Nacional para el Federalismo y el Desarrollo Municipal Website: <http://www.inafed.gob.mx/work/enciclopedia/EMM15mexico/municipios/15048a.html>.
- INE, (2009). Fourth National Communication to the United Nations Framework Convention on Climate Change. National Institute of Ecology. Mexico. 119-174 pp
- INEGI, (2014). Vector edaphological data set, scale 1:250000 Series II (National Continuum), scale: 1:250000. Edition: 2. National Institute of Statistics and Geography. Aguascalientes, Ags., Mexico. http://www.conabio.gob.mx/informacion/metadata/gis/eda250s2gw.xml?_httpcache=yes&_xsl=/db/metadata/xsl/fgdc_html.xsl&_indent=no.
- INEGI, (2021a). State political division 1:250000. 2021. National Institute of Statistics and Geography http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/?vns=gis_root/dipol/estata/dest21gw.
- INEGI, (2021b). Municipal political division 1:250000. 2021. National Institute of Statistics and Geography. http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/?vns=gis_root/dipol/mupal/mun21gw
- do dicha tendencia en los dos escenarios proyectados, donde dichas zonas solo se encontraron en pequeños manchones en cuatro municipios: Atlacomulco, San Felipe del Progreso, Jicotitlán y Jiquipilco.
- La reducción de las HF se debe principalmente al aumento de la temperatura. Con base en este análisis se pronostica que la temperatura media aumente en promedio 1.6 °C y que las temperaturas más altas se presentarán en Acambay y Temascalcingo. Por lo tanto, se puede inferir un efecto desfavorable del calentamiento global en los próximos 20 años, lo que repercutirá en la falta de horas frío en el invierno, causando problemas en los cultivos que requieren cierta cantidad de estas para su crecimiento y desarrollo.

Fin de la versión en español

- IPCC, (2021). Summary for policy makers. In: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J. B. R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, & B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press.
- Jindal, K. K., & Mankotia, M. S. (2004). Impact of changing climatic conditions on chilling units, physiological attributes and productivity of apple in western Himalayas. *Acta Horticulturae*, 662, 111-117. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2004.662.13>.
- Luedeling, E., Girvetz, E. H., Semenov, M. A., & Brown, P. H. (2011). Climate change affects winter chill for temperate fruit and nut trees. *PLoS ONE*, 6(5), e20155. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0020155>.
- Luedeling, E., Zhang, M., & Girvetz, E. H. (2009). Climatic changes lead to declining winter chill for fruit and nut trees in California during 1950-2099. *PLoS ONE*, 4(7) e6166, 1950-2099. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0006166>.
- Mateos, E., Santana, J. S., Montero-Martínez, M. J., Deeb, A., & Grunwaldt, A. (2015). Possible climate change evidence in ten Mexican watersheds. *Physics and Chemistry of the Earth*, 91, 10-19. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2015.08.009>.
- Medina-García, G., Ruiz-Corral, J. A., Ramírez-Legarreta, M. R., & Díaz-Padilla, G. (2011). Effect of climate change on cold accumulation in the apple-growing region of Chihuahua. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 2(spe2), 251-

263. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-09342011000800007&lng=es&tlng=es.
- Mendoza-Cariño, M., Bautista-Olivas, A. L., Mendoza-Cariño, D., Ortiz-Solorio, C. A., Duarte-Tagles, H., & Cruz-Flores, G. (2023). Agroclimatic zoning of the state of Nayarit, Mexico. *Atmósfera*, 36(1), 123-142. <https://doi.org/10.20937/atm.53002>.
- Mitre, L., Martínez, J., & Bayona, A. (2014). Atlas geológico ambiental del Estado de México. Centro de Geociencias de la UNAM: Gobierno del Estado de México.
- Perdomo-López, J. A. (2015). Acclimation of photosynthesis to water deficit and high temperature: physiological and biochemical aspects. Doctoral thesis. Universitat de les Illes Balears. 228 pp. chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgiclfindmkaj/https://dspace.uib.es/xmlui/bitstream/handle/11201/2710/Perdomo_Lopez_JAlejandro.pdf?sequence=1&isAllowed=y.
- Richardson, E. A., Seeley, S. D., & Walker, D. R. (1974). A model for estimating the completion of rest for Redhaven and Elberta peach trees. *HortScience*, 9(4), 331-332. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.9.4.331>.
- Ruiz, C. J. A., Medina, G. G., Manríquez, O. J. D., & Ramírez, D. J. L. (2010). Vulnerability assessment and proposals for adaptation measures at the regional level of some staple and fruit crops under climate change scenarios. INIFAP-INE Project Final Report. Guadalajara, Jal. 108 p.
- Santillán, E. L. E., Blanco, M. F., Magallanes, Q. R., García, H. J. L., Cerano, P. J., Delgadillo, R. O., & Valdez, C. R. D. (2011). Extreme temperature trends in Zacatecas, Mexico. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 2(spe2), 207-219. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-09342011000800004&lng=es&tlng=es.
- Tejeda-Martínez, A. (1991). An exponential model of the curve of mean monthly hourly air temperature. *Atmósfera*, 4(3), 139-144. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=56504302>
- Tian, Z., Yang, X., Sun, L., Fischer, G., Liang, Z., & Pan, J. (2014). Agroclimatic conditions in China under climate change scenarios projected from regional climate models. *International Journal of Climatology*, 34(9), 2988-3000. <https://doi.org/10.1002/joc.3892>.
- Van, V. D. P., Edmonds, J., Kainuma, M., Riahi, K., Thomson, A., Hibbard, K., Hurtt, G. C., Kram, T., Krey, V., Lamarque, J. F., & Masui, T. (2011). The representative concentration pathways: an overview. *Climatic Change*. 109(1), 5-31. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0148-z>.
- Velasco, I., & Pimentel, E. (2010). Papadakis agroclimatic zonation applied to the state of Sinaloa, Mexico. *Investigaciones Geográficas (Mx)*, (73), 86-102. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-46112010000300007&lng=es&tlng=es.
- Vinson, E. (2018) (ed). Fruit culture in Alabama. Winter chilling requirements. Agriculture. ANR-0053-D. Alabama A&M University and Auburn University. chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgiclfindmkaj/https://www.aces.edu/wp-content/uploads/2019/02/ANR-0053-D_WinterChilling_121418Lg.pdf.
- Yu, H., Luedeling, E., & Xu, J. (2010). Winter and spring warming result in delayed spring phenology on the Tibetan Plateau. *PNAS*. 107(51), 22151-22156. <https://doi.org/10.1073/pnas.1012490107>.
- Zarazúa, V. P., Ruiz, C. J. A., González, E. D. R., Flores, L. E. H., & Ron, P. J. (2011a). Climate and agroclimatic change for the autumn-winter cycle in the Ciénega de Chapala region. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 2(spe2), 295-308. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-09342011000800010&lng=es&tlng=es.
- Zarazúa, V. P., Ruiz, C. J. A., González, E. D. R., Flores, L. H. E., & Ron, P. J. (2011b). Impacts of climate change on maize agroclimatology in Ciénega de Chapala, Jalisco. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 2(spe2), 351-363. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-09342011000800014&lng=es&tlng=es.