

## El cambio climático afecta el número de horas de los rangos térmicos del chile en el norte-centro de México\*

### Climate change affects the number of hours in the thermal ranges of chilli in North-Central Mexico

Guillermo Medina-García<sup>1</sup>, Jaime Mena-Covarrubias<sup>2</sup>, José Ariel Ruiz-Corral<sup>3§</sup>, Víctor Manuel Rodríguez-Moreno<sup>4</sup> y Jesús Soria-Ruiz<sup>5</sup>

<sup>1,2</sup>Campo Experimental Zacatecas-INIFAP. Carretera Zacatecas-Fresnillo km 24.5, Calera, Zacatecas, México. (medina.guillermo@inifap.gob.mx; mena.jaime@inifap.gob.mx). <sup>3</sup>Campo Experimental Centro Altos de Jalisco- INIFAP. Carretera libre Tepatitlán-Lagos de Moreno km 8, Tepatitlán, Jalisco, México. <sup>4</sup>Campo Experimental Pabellón- INIFAP. Carretera Aguascalientes-Zacatecas km 32.5, Pabellón de Arteaga, Aguascalientes, México. (rodriguez.victor@inifap.gob.mx). <sup>5</sup>Sitio Experimental Metepec-INIFAP. Carretera Toluca-Zitácuaro km 4.5, Vialidad Adolfo López Mateos s/n, Zinacantepec, Estado de México, México. (soria.jesus@inifap.gob.mx). <sup>§</sup>Autor para correspondencia: ruiz.ariel@inifap.gob.mx.

## Resumen

En México el cultivo del chile tiene una larga tradición cultural y es uno de los principales centros de origen y domesticación, anualmente se siembran en promedio 97 306 ha en el Norte Centro del país. Sin embargo, la productividad del cultivo de chile es muy errática debido a factores bióticos y abióticos que se presentan durante su desarrollo. Temperaturas extremas y la disponibilidad de agua son dos de los factores de estrés abiótico dominantes. El objetivo de este trabajo fue conocer el efecto del calentamiento global, sobre el rango térmico del cultivo de chile. Se realizó un análisis histórico sobre la variación del número de horas con temperatura dentro y fuera del rango térmico de chile, y un análisis similar en los escenarios climáticos 2050 y 2070 en los RCP 4.5 y 8.5. Tanto en el análisis histórico como en las climatologías se encontraron efectos positivos y negativos del calentamiento global. El calentamiento global favorecerá al cultivo de chile con un aumento de la superficie (22.6%) con temperatura horaria dentro de los umbrales de desarrollo (15 a 32 °C) y un aumento de la superficie (15.8%) dentro

## Abstract

In Mexico, chili cultivation has a long cultural tradition and is one of the main centers of origin and domestication. An average of 97,306 ha is planted annually in the north of the country. However, the productivity of the chili crop is very erratic due to biotic and abiotic factors that occur during its development. Extreme temperatures and water availability are two of the dominant abiotic stressors. The objective of this work was to know the effect of global warming, on the thermal range of the chili crop. A historical analysis was performed on the variation of the number of hours with temperature inside and outside the thermal range of chili, and a similar analysis in the climatic scenarios 2050 and 2070 in the RCPs 4.5 and 8.5. Both in the historical analysis and in the climatologies we found positive and negative effects of global warming. Global warming will favor chilli cultivation with a surface increase (22.6%) with hourly temperature within development thresholds (15 to 32 °C) and a surface increase (15.8%) within the optimum temperature range (18 to 28 °C). Chili cultivation will be limited by the increase

\* Recibido: octubre de 2017  
Aceptado: diciembre de 2017

del rango de temperatura óptima (18 a 28 °C). El cultivo de chile se verá limitado por el aumento (20.8%) de la superficie con temperatura horaria mayor al umbral superior (32 °C) y un aumento (18.5%) de la superficie con temperatura nocturna horaria mayor al umbral superior de temperatura nocturna (18 °C) en el RCP 4.5 y en la climatología 2050. El estrés por temperatura alta repercutirá en la disminución del rendimiento debido al efecto negativo en los procesos de polinización y amarre de frutos.

**Palabras clave:** *Capsicum annuum*, calentamiento global, México, RCP, temperatura horaria.

## Introducción

El género *Capsicum* comprende más de 200 variedades de chile, agrupadas en más de 30 especies, de las cuales, cinco están domesticadas, y es *C. annuum* L. la más conocida y de mayor importancia económica, ya que es la más ampliamente distribuida y utilizada a nivel mundial (Madhavi *et al.*, 2016); esta especie agrupa a la mayoría de los tipos de chile cultivados en México, entre los que destacan: ancho, serrano, jalapeño, piquín, Anaheim, morrón, mirasol, pasilla y mulato (Muñoz y Pinto, 1970; Pozo, 1981; Laborde y Pozo, 1984).

En México el cultivo del chile tiene una larga tradición cultural y es uno de los principales centros de origen y domesticación (Long, 1982; Laborde y Pozo 1984), tal como lo indican vestigios arqueológicos en donde se han encontrado semillas de forma ancestral en el valle de Tehuacán, Puebla, con una antigüedad de 8 500 años (Evans, 1993). Anualmente se siembra en México un promedio de 97 306 ha (2010-2014) con chile bajo condiciones de riego en el ciclo de cultivo primavera-verano, la cual se realiza principalmente en los estados de Zacatecas 34.9%, Chihuahua 27%, San Luis Potosí 15%, Durango 5.2%, Guanajuato 3.7%, Jalisco 3% y Aguascalientes 0.9%, más de 90% de la superficie nacional (SIACON, 2014).

Estos estados se encuentran en la región norte-centro del país en lo que se conoce como Altiplano Mexicano y se cultivan principalmente las variedades de chile ancho, pasilla, mirasol o guajillo y puya, como chile seco. Sin embargo, la productividad del cultivo de chile es muy errática debido tanto a factores bióticos y abióticos que se presentan durante el desarrollo del cultivo. Temperaturas

(20.8%) in the surface area with hourly temperature above the upper threshold (32 °C) and an increase (18.5%) in the area with a night time temperature above the upper threshold of night temperature (18 °C) in RCP 4.5 and in climatology 2050. High temperature stress will have an effect on the yield decrease due to the negative effect on pollination and fruit binding processes.

**Keywords:** *Capsicum annuum*, global warming, hourly temperature, Mexico, RCP.

## Introduction

The genus *Capsicum* comprises more than 200 varieties of chili, grouped in more than 30 species, of which, five are domesticated, and is *C. annuum* L. the most known and of greater economic importance, as it is the most widely distributed and used worldwide (Madhavi *et al.*, 2016); this species groups the majority of the types of chili cultivated in Mexico, among which stand out: ancho, serrano, jalapeño, piquín, Anaheim, morrón, mirasol, pasilla and mulato (Muñoz and Pinto, 1970; Pozo, 1981; Laborde and Pozo, 1984).

In Mexico the cultivation of chili has a long cultural tradition and is one of the main centers of origin and domestication (Long, 1982; Laborde and Pozo 1984), as indicated by archaeological remains where ancestral seeds have been found in the valley of Tehuacan, Puebla, with an antiquity of 8 500 years (Evans, 1993). Annually, an average of 97 306 ha (2010-2014) is planted in Chili under irrigation conditions in the spring-summer crop cycle, mainly in the states of Zacatecas, 34.9%, Chihuahua 27%, and San Luis Potosí 15%, Durango 5.2%, Guanajuato 3.7%, Jalisco 3% and Aguascalientes 0.9%, more than 90% of the national surface (SIACON, 2014).

These states are located in the North-Central region of the country in what is known as the Mexican Altiplano and the varieties of wide chili, pasilla, mirasol or guajillo and puya, such as dry chili are grown. However, the productivity of the chili crop is very erratic due to both the biotic and abiotic factors that occur during the development of the crop. Extreme and inadequate temperatures and water availability are two of the dominant abiotic stressors in this chili producing region, which drastically reduce the growth and production of this crop.

extremas e inadecuadas y la disponibilidad de agua son dos de los factores de estrés abiótico dominantes, en esta región productora de chile, que reducen drásticamente el crecimiento y producción de este cultivo.

Para desarrollar las tecnologías que se requieren para superar los efectos limitantes del estrés abiótico sobre la productividad del cultivo de chile, se necesita entender los mecanismos de tolerancia de la planta, las fuentes de tolerancia y los métodos para incorporar esas cualidades a la planta de chile. Por lo tanto, un primer paso es conocer los rangos de temperatura que afectan los procesos fisiológicos de las plantas de chile (Taiz y Zeiger, 2006). La temperatura máxima y mínima que definen límites de crecimiento y desarrollo de un organismo, y una temperatura óptima a la cual el crecimiento avanza con mayor rapidez, son definidas como temperaturas cardinales. La temperatura elevada afecta varios aspectos de la fisiología y crecimiento de la planta de chile, los cuales a su vez pueden tener un efecto directo o indirecto en el amarre de fruto, y como consecuencia de ello, disminuir el rendimiento.

El chile es originario de regiones tropicales y subtropicales de América Central y América del Sur, y requiere condiciones de temperatura cálida para su desarrollo, ya que su crecimiento óptimo está entre 25 y 30 °C (Madhavi *et al.*, 2016); sin embargo, temperatura superior a los 32 °C, o inferiores a los 15 °C afectan una variedad de funciones fisiológicas, el crecimiento normalmente se retrasa y el rendimiento se reduce (Mercado *et al.*, 1997; Gunawardena y De Silva, 2014) esta sensibilidad a temperaturas extremas es más marcada para los tipos de chile que se han seleccionado para regiones de cultivo templadas, como el Altiplano Mexicano, donde se produce chile seco, principalmente las variedades ancho, pasilla, mirasol y puya, cuya temperatura óptima para su desarrollo está entre 18 y 28 °C (Medina y Mena, 2016).

Existen variaciones en los reportes de temperatura para el desarrollo del chile, Sanders *et al.*, 1980, indican que la temperatura mínima para el crecimiento y desarrollo de la planta de chile es 18 °C, con plantas en el rango de 5-15 °C se tiene crecimiento pobre. El mayor crecimiento vegetativo ocurre con temperaturas en el rango de 25 a 27 °C durante el día y a 18-20 °C durante la noche (Bakker y van Uffelen, 1988).

El factor más importante que determina la diferenciación de la flor es la temperatura ambiental, especialmente durante la noche (Bosland y Votava, 2000). La temperatura del aire

In order to develop the technologies required to overcome the limiting effects of abiotic stress on the productivity of the chili crop, it is necessary to understand the tolerance mechanisms of the plant, the sources of tolerance and the methods to incorporate these qualities into the chili plant. Therefore, a first step is to know the temperature ranges that affect the physiological processes of the chili plants (Taiz and Zeiger, 2006). The maximum and minimum temperature that defines limits of growth and development of an organism, and an optimum temperature at which the growth advances more quickly, are defined as cardinal temperatures. The high temperature affects several aspects of the physiology and growth of the chili plant, which in turn can have a direct or indirect effect on the fruit mooring, and as a consequence, decrease the yield.

Chili originates from tropical and subtropical regions of Central and South America, and requires warm temperature conditions for its development, since its optimum growth is between 25 and 30 °C (Madhavi *et al.*, 2016); however, temperatures above 32 °C, or below 15 °C affect a variety of physiological functions, growth is usually delayed and performance is reduced (Mercado *et al.*, 1997; Gunawardena and De Silva, 2014) this sensitivity to extreme temperatures is more pronounced for the types of chili that have been selected for temperate cultivation regions, such as the Mexican Altiplano, where dry chili is produced, mainly the wide, pasilla, mirasol and puya varieties, whose optimal temperature for their development is between 18 and 28 °C (Medina and Mena, 2016).

There are variations in temperature reports for the development of chili, Sanders *et al.*, 1980, indicate that the minimum temperature for growth and development of the chili plant is 18 °C, with plants in the range of 5-15 °C has poor growth. The highest vegetative growth occurs with temperatures in the range of 25 to 27 °C during the day and at 18-20 °C at night (Bakker and van Uffelen, 1988).

The most important factor determining flower differentiation is environmental temperature, especially at night (Bosland and Votava, 2000). The temperature of the air also has a great effect on the formation of pollen and its viability; temperature above 30 °C occurring 15 days before pollination causes pollen sterility (Cochran, 1938), and night temperature of 10 ± 2 °C reduces the number and percentage of germination of the pollen grains (Shaked *et al.*, 2004). The largest fruit mooring occurs when the temperature of day and night is between 21 and 16 °C, respectively.

también tiene un gran efecto sobre la formación del polen y su viabilidad; temperatura arriba de 30 °C que se presenta 15 días antes de la polinización ocasiona esterilidad del polen (Cochran, 1938), y temperatura nocturna de 10±2 °C reduce el número y el porcentaje de germinación de los granos de polen (Shaked *et al.*, 2004). El mayor amarre de fruta ocurre cuando la temperatura del día y de la noche es entre 21 y 16 °C, respectivamente.

El rendimiento es alto cuando la temperatura del aire, en el día, durante el amarre de fruto, fluctúa entre los 18 y 32 °C, los frutos no amarran cuando la temperatura durante el día es mayor de 32 °C (Olareweju, 1988; Aloni *et al.*, 1999). En general, la temperatura óptima para el amarre de frutos en chile dulce es de 22 a 26 °C durante el día y 15 to 18 °C durante la noche (Rylski y Spigelman, 1982).

Los cambios morfológicos visibles en plantas de chile expuestas a un estrés ambiental durante el período de floración y fructificación es la caída de botones florales, flores y frutos pequeños (Saha *et al.*, 2010). El amarre pobre de frutos se considera como una de las mayores barreras para la adaptación tropical del chile pimienta. Los estados de desarrollo de la flor y las primeras fases de llenado de la semilla del chile después de la polinización son más sensibles al estrés por calor (Erickson y Markhart, 2001).

Con el cambio climático se espera que para el año 2050 la temperatura promedio de la tierra se incremente de 2 a 5 °C, o más, de acuerdo al Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC, 2014). Actualmente el cambio climático representa uno de los principales problemas que enfrenta la agricultura, debido a las alteraciones que causa en los patrones climáticos y por tanto en la agroclimatología relacionada con el manejo de las actividades agrícolas. En este estudio se pretende conocer cuál será el efecto del calentamiento global, en el número de horas dentro y fuera del rango térmico del cultivo de chile en escenarios climáticos futuros.

## Materiales y métodos

El área de estudio comprendió los principales estados productores de chile seco del norte centro de México: Chihuahua, Durango, Zacatecas, Aguascalientes, Jalisco, Guanajuato y San Luis Potosí. Se utilizaron datos diarios de temperatura máxima y temperatura mínima de las

The yield is high when the air temperature, during the day, during the mooring of fruit, fluctuates between 18 and 32 °C, the fruits do not tie when the temperature during the day is greater of 32 °C (Olareweju, 1988; Aloni *et al.*, 1999). In general, the optimum temperature for fruit berthing is 22 to 26 C during the day and 15 to 18 °C during the night (Rylski and Spigelman, 1982).

The visible morphological changes in chili plants exposed to environmental stress during the flowering and fruiting period are the fall of floral buds, flowers and small fruits (Saha *et al.*, 2010). The poor mooring of fruits is considered as one of the biggest barriers for the tropical adaptation of chili peppers. Flower development stages and early stages of chili seed filling after pollination are more sensitive to heat stress (Erickson and Markhart, 2001).

With climate change it is expected that by 2050 the average temperature of the earth will increase from 2 to 5 °C, or more, according to the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC, 2014). Currently, climate change represents one of the main problems facing agriculture, due to the changes it causes in climate patterns and therefore in agro-climatology related to the management of agricultural activities. In this study, we intend to know the effect of global warming on the number of hours inside and outside the thermal range of the chili crop in future climatic scenarios.

## Materials and methods

The study area comprised the main dry chili producing states of north central Mexico: Chihuahua, Durango, Zacatecas, Aguascalientes, Jalisco, Guanajuato and San Luis Potosi. Daily data of maximum temperature and minimum temperature of the stations of weather of the National Meteorological Service were used. It selected 131 stations with more than 30 years and more than 90% of data. Figure 1 presents the study area, areas with potential for chili production (Medina and Mena, 2016) and the location of the stations used.

With the daily data of maximum and minimum temperature, hourly data were obtained (Snyder, 1985) of the entire historical series of data of the stations. With these data the number of hours in which the temperature was inside and outside the optimal cardinal temperature ranges for chili (Table 1) was estimated during the growing cycle. With the

estaciones de clima del Servicio Meteorológico Nacional. Se seleccionaron 131 estaciones con más de 30 años y más de 90% de datos. En la Figura 1 se presenta el área de estudio, las áreas con potencial para la producción de chile (Medina y Mena, 2016) y la ubicación de las estaciones utilizadas.

Con los datos diarios de temperatura máxima y mínima, se obtuvieron datos horarios (Snyder, 1985) de toda la serie histórica de datos de las estaciones. Con estos datos se estimó el número de horas en que la temperatura estuvo dentro y fuera de los rangos óptimos de las temperaturas cardinales para chile (Cuadro 1) durante el ciclo de cultivo. Con el número de horas de cada rango para el ciclo de cultivo abril-octubre, de cada uno de los años de la serie de cada estación, se hicieron análisis regionales de tendencias históricas utilizando promedios móviles de 20 años.

**Cuadro 1. Valores umbrales y óptimos de temperaturas cardinales para chile seco cultivado en la región de estudio.**

**Table 1. Threshold and optimal values of cardinal temperatures for dry chili cultivated in the study region.**

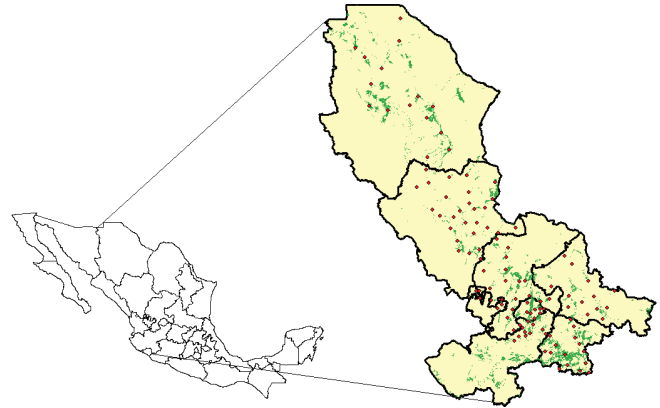
Variable	Umbral inferior	Óptimo	Umbral superior
Temperatura	15	18 - 28	32
Temperatura nocturna*	10	15 - 17.5	18

\*= la temperatura nocturna se consideró de las 19 a las 6 h.

Para generar mapas con el número de horas de temperatura de cada rango se estimaron modelos de regresión para el ciclo de cultivo abril a octubre. Para esto se seleccionaron 61 estaciones a nivel nacional abarcando diferentes ambientes. Se obtuvieron las temperaturas horarias por día de cada una de las 61 estaciones, se obtuvieron el número de horas de temperatura para cada rango y se relacionaron con la temperatura máxima y mínima medias en el mismo periodo de cultivo. Se obtuvo así un modelo para cada rango para el ciclo de cultivo abril-octubre.

Para estimar el efecto del cambio climático en el número de horas dentro y fuera de las temperaturas cardinales, se utilizó el sistema de información de cambio climático de la República Mexicana del INIFAP (Ruiz-Corral *et al.*, 2016), el cual consta de climatología base del periodo

number of hours of each range for the April-October crop cycle, each of the series years of each season, regional analyzes of historical trends were made using 20-year moving averages.



**Figura 1. Zona de estudio, áreas con potencial para la producción de chile seco y estaciones climáticas utilizadas.**

**Figure 1. Area of study, areas with potential for the production of dry chili and climatic stations used.**

To generate maps with the number of hours of temperature of each range, regression models were estimated for the crop cycle from April to October. For this, 61 stations were selected nationwide covering different environments. The hourly temperatures per day of each of the 61 stations were obtained, the number of hours of temperature for each range were obtained and they were related to the average maximum and minimum temperatures in the same period of culture. A model was thus obtained for each range for the April-October crop cycle.

In order to estimate the effect of climate change on the number of hours inside and outside the cardinal temperatures, the climate change information system of the Mexican Republic of INIFAP was used (Ruiz-Corral *et al.*, 2016) which consists of base climatology of the period 1961-2010 and climatology of the years 2041 to 2080 in the representative concentration routes (RCP) 4.5 and 8.5 of greenhouse gases (GEI). These were obtained from information from the WorldClim Global Change data portal, which generated an assembly model composed of 11 models of general circulation (GCM) reduced in scale and calibrated (Walton *et al.*, 2013) selected for Mexico BCC-CSM1-1, CCSM4, GISS-E2-R, HadGEM2-AO, HadGEM2-ES, IPSLCM5A-LR, MIROC-ESM-CHEM, MIROC-ESM, MIROC5, MRI-CGCM3, NorESM1-M).

1961-2010 y climatología de los años 2041 a 2080 en las rutas de concentración representativas (RCP) 4.5 y 8.5 de gases de efecto invernadero (GEI). Los cuales fueron obtenidos a partir de información del portal de datos de Cambio Global de WorldClim con los que se generó un modelo ensamble integrado por 11 modelos de circulación general (GCM) reducidos en escala y calibrados (Walton *et al.*, 2013) seleccionados para México (BCC-CSM1-1, CCSM4, GISS-E2-R, HadGEM2-AO, HadGEM2-ES, IPSLCM5A-LR, MIROC-ESM-CHEM, MIROC-ESM, MIROC5, MRI-CGCM3, NorESM1-M).

Se utilizó un RCP de emisiones intermedias (4.5) el cual es consistente con un futuro con reducciones de emisiones relativamente ambiciosas y un RCP de emisiones altas (8.5) que es coherente con un futuro sin cambios de política para reducir las emisiones (Van Vuuren *et al.*, 2011). Con estos escenarios se realizaron las proyecciones. Se utilizaron los valores de temperatura máxima y temperatura mínima de los años 2041 a 2080. Con los datos mensuales se obtuvieron los anuales para los escenarios climáticos 2041-2060 y 2061-2080, en adelante referidos como climatologías o años 2050 y 2070 respectivamente.

## Resultados y discusión

### Tendencias históricas

Para validar la estimación de los datos horarios de temperatura con el modelo propuesto, se utilizaron datos diarios de temperatura máxima y mínima de una estación de clima automática y se compararon con sus datos horarios reales (Figura 2). Los reales y estimados se ajustaron a una regresión lineal resultando una  $R^2=0.9$ , cumpliendo con los supuestos de validación 1:1; es decir, el intercepto fue estadísticamente igual a cero y la pendiente estadísticamente igual a uno (Fritz *et al.*, 1997).

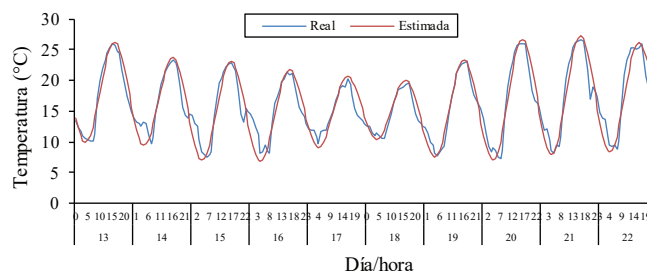
Con los datos horarios se estimó el número de horas en que la temperatura estuvo dentro y fuera de los rangos óptimos de temperaturas cardinales para el desarrollo del chile en el ciclo de cultivo abril a octubre. El análisis de tendencias históricas regionales de los años 1981 a 2010 y con promedios cada 20 años (considerando las 131 estaciones) se presenta en la Figura 3.

The RCP intermediate emissions was used (4.5) which is consistent with future reductions relatively ambitious emissions and RCP high emissions (8.5) which is consistent with a future without policy changes to reduce emissions (Van Vuuren *et al.*, 2011). With these scenarios the projections were made. The values of maximum temperature and minimum temperature of the years 2041 to 2080 were used. Monthly data were obtained for climatic scenarios 2041-2060 and 2061-2080, hereafter referred to as climatologies or years 2050 and 2070 respectively.

## Results and discussion

### Historical Trends

To validate the estimation of temperature time data with the proposed model, daily data of maximum and minimum temperature of an automatic climate station were used and compared with their real time data (Figure 2). The real and estimated were adjusted to a linear regression resulting in a  $R^2=0.9$ , fulfilling the 1:1 validation assumptions; that is, the intercept was statistically equal to zero and the slope statistically equal to one (Fritz *et al.*, 1997).

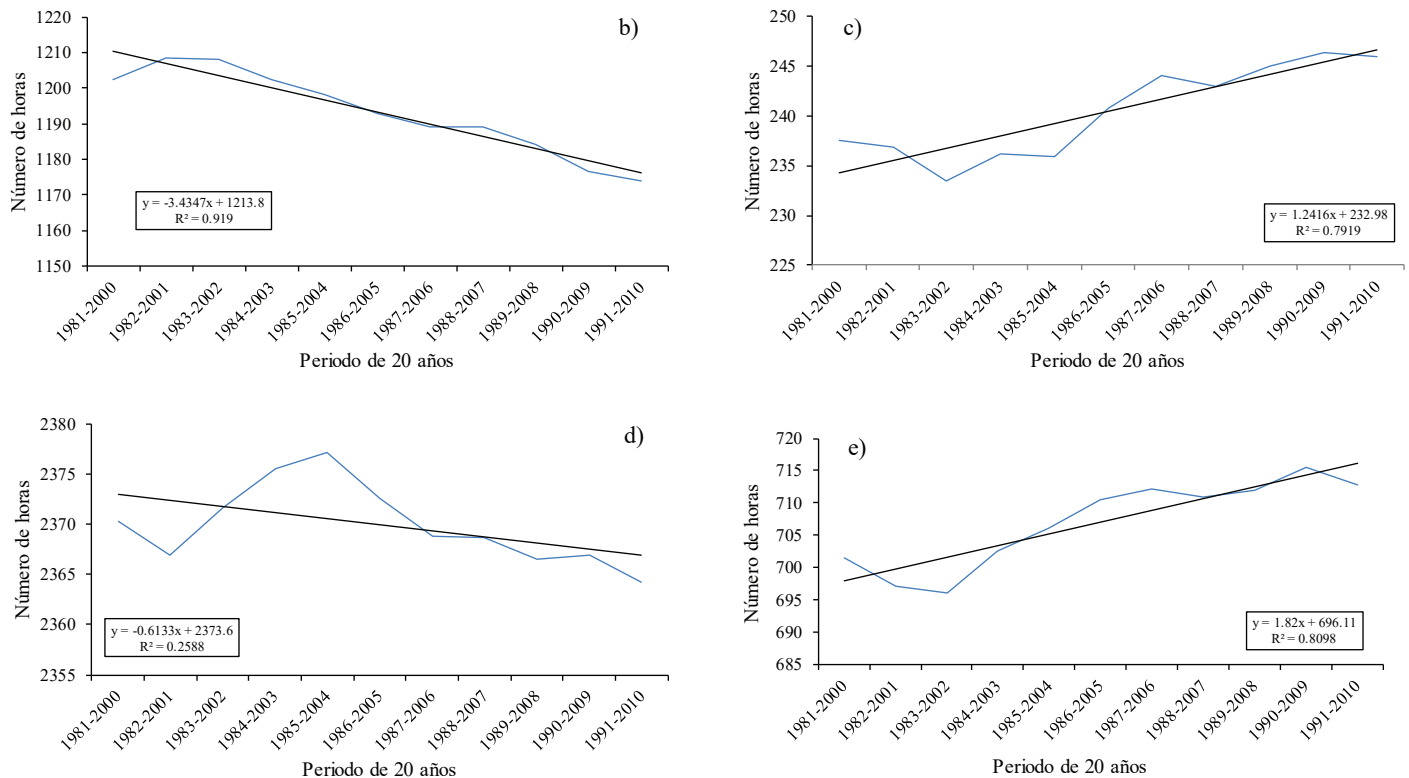


**Figura 2. Datos horarios de temperatura real y estimada con el modelo sinodal.**

**Figure 2. Actual and estimated temperature time data with the synod model.**

With the hourly data we estimated the number of hours in which the temperature was inside and outside the optimal cardinal temperature ranges for the development of chili in the crop cycle from April to October. The analysis of regional historical trends from 1981 to 2010 and with averages every 20 years (considering the 131 stations) is presented in Figure 3.

El número de horas dentro del rango de temperaturas umbrales para el desarrollo de chile (15 a 32 °C), tiene una tendencia en aumento ( $p= 0.0002$ ); es decir, el número de horas con temperatura apropiada para chile (Cochran, 1938; Shaked *et al.*, 2004) se ha ido incrementando (Figure 3a). La tendencia histórica del número de horas con temperatura abajo del umbral mínimo de temperatura (15 °C) para el desarrollo del chile (Figure 3b), es hacia la baja ( $p<.0001$ ), lo cual también es un beneficio para este cultivo (Mercado *et al.*, 1997).



**Figura 3. a) tendencia histórica del número de horas en el rango de temperaturas umbrales para chile (15 a 32 °C); b) abajo del umbral inferior (15 °C); c) arriba del umbral superior (32 °C); d) en el rango óptimo (18 a 28 °C); y e) arriba del umbral superior de temperatura nocturna (18 °C) en la región productora de chile seco en México, en el ciclo agrícola abril-octubre.**

**Figure 3. a) historical trend of the number of hours in the range of threshold temperatures for chili (15 to 32 °C); b) below the lower threshold (15 °C); c) above the upper threshold (32 °C); d) in the optimum range (18 to 28 °C); and e) above the upper threshold of nocturnal temperature (18 °C) in the dry chili producing region of Mexico in the April-October agricultural cycle.**

Sin embargo, la temperatura superior a 32 °C, que es perjudicial para chile debido a que aumenta la esterilidad del polen y el aborto de frutos (Olaresweju, 1988; Aloni *et al.*, 1999) tiene una tendencia a incrementarse, al mismo tiempo aumentarían los días de estrés por calor (Figura 3c). Por lo tanto, dos de las variables indican un efecto

The number of hours within the threshold temperature range for the development of chili (15 to 32 °C), has an increasing tendency ( $p= 0.0002$ ); that is, the number of hours with appropriate temperature for chili (Cochran, 1938; Shaked *et al.*, 2004) has been increasing (Figure 3a). The historical trend of the number of hours with

favorable (aumento en el número de horas dentro del rango de desarrollo de *Capsicum* y disminución del número de horas abajo del umbral mínimo), en tanto que la variable de horas arriba del umbral superior de temperatura, que afecta negativamente la polinización y el amarre de frutos, también se ha incrementado.

El número de horas con temperatura dentro del rango óptimo el desarrollo de chile en la región norte centro de México (18 a 28 °C) ha disminuido, tal como se observa en la Figura 3d y por el contrario, la temperatura nocturna mayor de 18 °C (Figura 3e) ha aumentado, lo cual incrementa el riesgo de aborto de flores y frutos pequeños (Gunawardena y De Silva, 2014), la respuesta observada de estas dos últimas variables significa una tendencia de menor rendimiento potencial del chile.

El número de horas abajo de los umbrales mínimos de temperatura ha disminuido, esto es favorable para el cultivo de chile (Shaked *et al.*, 2004) porque hay más horas con temperatura apropiada para el desarrollo de chile, pero el número de horas arriba de los umbrales superiores ha aumentado y esto si es muy perjudicial para el cultivo del chile debido a que el estrés térmico afecta especialmente la altura de la planta, las ramas, el diámetro de la copa y el número de frutos (Gunawardena y De Silva, 2014).

### Escenarios climáticos

Para el análisis de escenarios climáticos futuros, el número de horas de cada rango de temperatura para el ciclo de cultivo de abril a octubre se relacionó con la temperatura máxima y mínima medias en ese mismo periodo, esto para las 61 estaciones distribuidas en toda el área de estudio. Los modelos generados presentaron valores de  $R^2$  entre 0.8526 y 0.9759, excepto el modelo del rango de temperatura nocturna que resultó con un valor de 0.683, todos los modelos resultaron con una  $p \leq 0.0001$ .

Con estos modelos se generaron mapas del número de horas de cada uno de los rangos o temperaturas umbrales de desarrollo del chile (Cuadro 1) para el escenario climático actual (1981-2010) y para las climatologías 2030, 2050 y 2070, para las rutas de concentración de gases de efecto invernadero (RCP) 4.5 y 8.5. Las  $R^2$  de todos los modelos fueron aceptables a muy buenas dado que los valores fueron desde 0.85 a 0.97 tanto para las temperaturas diurnas, como

temperature below the minimum temperature threshold (15 °C) for chili development (Figure 3b) is downward ( $p \leq 0.0001$ ), which is also a benefit for this culture (Mercado *et al.*, 1997).

However, the temperature above 32 °C, which is harmful to chili because of increased pollen sterility and fruit abortion (Olareweju, 1988; Aloni *et al.*, 1999) has a tendency to increase at the same time would increase the days of heat stress (Figure 3c). Therefore, two of the variables indicate a favorable effect (increase in the number of hours within the range of *Capsicum* development and decrease in the number of hours below the minimum threshold), whereas the variable hours above the upper threshold of temperature, which negatively affects pollination and fruit binding, has also increased.

The number of hours with temperature within the optimum range the development of chili in the north central region of Mexico (18 to 28 °C) has decreased, as seen in Figure 3d and, conversely, the night temperature greater than 18 (Figure 3e) has increased, which increases the risk of abortion of flowers and small fruits (Gunawardena and De Silva, 2014), the observed response of these two last variables means a trend of lower potential yield of chili.

The number of hours below the minimum temperature thresholds has decreased, this is favorable for chili cultivation (Shaked *et al.*, 2004) because there are more hours with appropriate temperature for the development of chili, but the number of hours above the upper thresholds have increased and this is very detrimental to chili cultivation because the thermal stress especially affects plant height, branches, crown diameter and number of fruits (Gunawardena and De Silva, 2014).

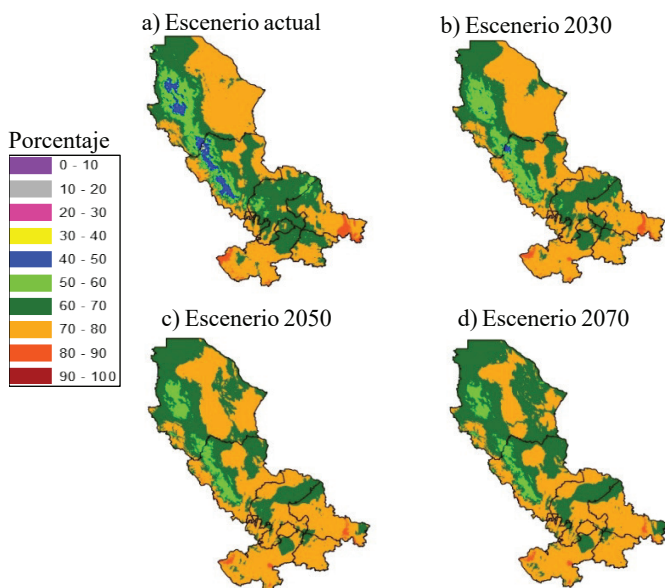
### Climate scenarios

For the analysis of future climatic scenarios, the number of hours of each temperature range for the crop cycle from April to October was related to the mean maximum and minimum temperatures in that same period, this for the 61 stations distributed throughout the area study. The generated models presented values of  $R^2$  between 0.8526 and 0.9759, except the model of the night temperature range that resulted with a value of 0.683, all the models resulted with a  $p \leq 0.0001$ .



las nocturnas (Cuadro 2). Como ejemplo se presentan los mapas de dos rangos de temperatura. En la Figura 4 se muestran los mapas con el porcentaje del número de horas con temperatura entre los umbrales para el desarrollo de chile (15 a 32 °C) en el ciclo abril-octubre en la región norte centro.

El chile se siembra principalmente en las zonas que tienen entre 60 y 70% del número de horas totales en el ciclo agrícola dentro de este rango térmico de chile (Figura 4a, color verde oscuro); en la climatología 2050 la superficie con este rango se mantiene y luego aumenta 16.97% en la climatología 2070 en el RCP4.5. Considerando la superficie del escenario actual como 100%, en la Figura 4b se puede ver que para el año 2030 se tiene una disminución de 9.3% de la superficie entre 60 y 70% de horas dentro del rango térmico de chile al pasar de 100 a 90.7% (Cuadro 3), esto significa que habrá menor superficie con temperatura dentro del rango para el desarrollo de chile, en los estados de Zacatecas, Aguascalientes y Guanajuato.



**Figura 4. Porcentaje del número de horas con temperatura de 15 a 32 °C (umbrales para chile) en el ciclo de cultivo abril-octubre, en cuatro escenarios climáticos en la región productora de chile seco.**

**Figure 4. Percentage of the number of hours with temperatures of 15 to 32 °C (thresholds for chili) in the April-October crop cycle, in four climatic scenarios in the dry chili production region.**

En los escenarios climáticos 2050 y 2070, continuará la disminución en la superficie con temperaturas adecuadas para el desarrollo del cultivo de chile en los tres estados

With these models maps of the number of hours of each of the chili developmental thresholds or temperatures (Table 1) were generated for the current climatic scenario (1981-2010) and for the climatologies 2030, 2050 and 2070 for the routes of greenhouse gas concentration (RCP) 4.5 and 8.5. The  $R^2$  of all models were acceptable to very good since the values were from 0.85 to 0.97 for both daytime and nighttime temperatures (Table 2). As an example the maps of two temperature ranges are presented. Figure 4 shows the maps with the percentage of the number of hours with temperature between the thresholds for chili development (15 to 32 °C) in the April-October crop cycle in the North Central region.

The chili cultivation is mainly planted in areas that have between 60 and 70% of the total number of hours in the agricultural cycle within this chili thermal range (Figure 4a, dark green); in the 2050 climatology the surface with this range is maintained and then increases 16.97% in the climatology 2070 in RCP 4.5. Considering the surface of the current scenario as 100%, in Figure 4b it can be seen that by the year 2030 there is a decrease of 9.3% of the surface between 60 and 70% of hours within the thermal range of chili from 100 a 90.7% (Table 3), this means that there will be a smaller area with temperature within the range for the development of Chili, mainly in the states of Zacatecas, Aguascalientes and Guanajuato.

In the climatic scenarios 2050 and 2070, the decrease in the surface with suitable temperatures for the development of the chili crop in the three states mentioned above will continue, only in the state of Chihuahua there is a trend of increase in the surface with temperatures for the development of this crop in scenarios 2030, 2050 and 2070 (Figures 4a-d). Figure 5 presents the maps with the percentage of the number of hours with nocturnal temperature greater than the upper threshold for the optimal development of chili (>18 °C), in the April-October crop cycle in the north central region. chili cultivation is mainly planted in areas that have between 10 and 20% (gray color) and 20-30% (pink) of the total number of hours in the agricultural cycle (Figure 5a).

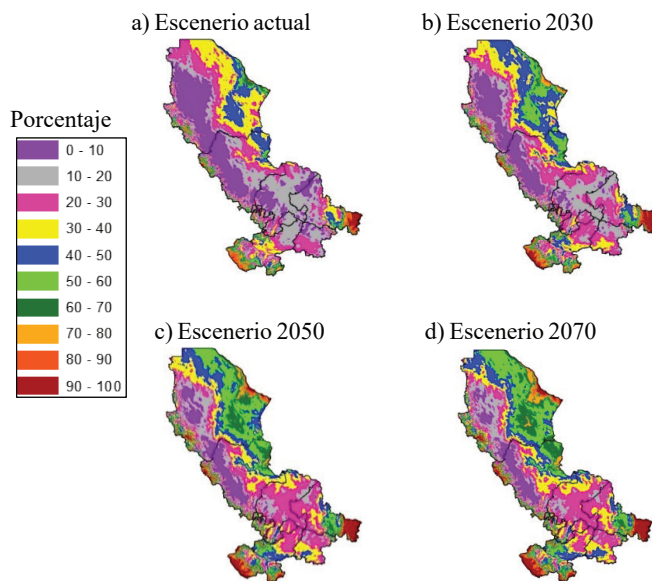
Considering the surface of the current scenario as 100%, in Figure 5b there is a decrease of the surface with percentage of 10 to 20 and increase of the surface of 20 to 30%, mainly in the states of Zacatecas, San Luis Potosí, Aguascalientes and Guanajuato, which means there will be more hours outside the upper night temperature threshold. In the states

antes mencionados, solo en el estado de Chihuahua hay una tendencia de incremento en la superficie con temperaturas propias para el desarrollo de este cultivo en los escenarios 2030, 2050 y 2070 (Figuras 4a-d). En la Figura 5 se presentan los mapas con el porcentaje del número de horas con temperatura nocturna mayor al umbral superior para el desarrollo óptimo de chile (>18 °C), en el ciclo de cultivo abril-octubre en la región norte centro. El cultivo de chile se siembra principalmente en las zonas que tienen entre 10 y 20% (color gris) y 20 a 30% (color rosa) del número de horas totales en el ciclo agrícola (Figura 5a).

Considerando la superficie del escenario actual como 100%, en la Figura 5b se tiene una disminución de la superficie con porcentaje de 10 a 20 y aumento de la superficie de 20 a 30%, principalmente en los estados de Zacatecas, San Luis Potosí, Aguascalientes y Guanajuato, lo que significa que habrá más horas fuera del umbral superior de temperatura nocturna. En los estados de Chihuahua y Durango será mayor el aumento del porcentaje de horas (Cuadro 8). En los escenarios climáticos 2050 y 2070, continuará el aumento de horas de la temperatura nocturna no óptima para el desarrollo de chile (Figuras 5c y 5d).

El comportamiento de la temperatura nocturna en el futuro implica que no habrá una buena diferenciación floral lo que lleva a un menor número de frutos por planta (Bosland y Votava, 2000). En el Cuadro 4 se muestra el porcentaje del número de horas con temperatura óptima para el desarrollo de chile (18 a 28 °C) en el ciclo de cultivo abril-octubre. El cultivo de chile se siembra principalmente en las zonas que tienen entre 40 y 50% del número total de horas en el ciclo agrícola.

of Chihuahua and Durango, the percentage of hours will increase (Table 8). In climatic scenarios 2050 and 2070, the increase in hours of non-optimal night temperature for the development of chili will continue (Figures 5c and 5d).



**Figura 5. Porcentaje del número de horas con temperatura nocturna mayor de 18°C (umbral superior para el desarrollo de chile) en el ciclo de cultivo abril-octubre, en el escenario actual y en tres escenarios climáticos futuros del RCP 4.5, en la región productora de chile seco en México.**

**Figure 5. Percentage of the number of hours with night temperatures over 18 °C (upper threshold for chili development) in the April-October crop cycle, in the current scenario and in three future climatic scenarios of RCP 4.5, in the producing region of dry chili in Mexico.**

**Cuadro 2. Coeficientes de modelos de regresión para estimar número de horas en cada rango de temperatura a partir de temperatura máxima y mínima media en el ciclo abril a octubre.**

**Table 2. Coefficients of regression models to estimate the number of hours in each temperature range from maximum and minimum average temperature in the April to October cycle.**

Rango °C	R <sup>2</sup>	Ciclo abril-octubre				Término independiente
		Max	Max <sup>2</sup>	Min	Min <sup>2</sup>	
Temperatura						
15 a 32	0.8706	239.60142	-5.88844	439.52304	-9.72051	-2357.95794
Mayor 32	0.9496	-217.97285	5.66378		0.46834	1786.99596
Menor 15	0.9698	-24.27162		-392.32033	8.09835	5555.29639
18 a 28	0.8526	174.95580	-4.46456	283.78972	-5.58132	-1691.21088
Temperatura nocturna						
15 a 17.5	0.633			33.14837	1.9537	-124.4844
Mayor 18	0.9759	-68.48367	1.55617		5.19371	435.96818
Menor 10	0.92680	-1.36157	0.07471	-289.21582	7.58344	2684.20953

**Cuadro 3. Porcentaje del número de horas dentro del rango térmico del chile (15-32°C) en el ciclo abril-octubre y su porcentaje en los escenarios climáticos futuros en la región norte-centro.**

**Table 3. Percentage of the number of hours within the chili thermal range (15-32 °C) in the April-October cycle and its percentage in future climatic scenarios in the North-Central region.**

Horas (%)	Escenario actual	RCP 4.5			RCP 8.5		
		2030	2050	2070	2030	2050	2070
40 - 50	100	17.83	0.49	0.11	18.25	0.69	0.41
50 - 60	100	82.72	48.47	39.78	84.49	49.99	25.05
60 - 70	100	90.7	99.74	116.97	90.4	98.38	148.77
70 - 80	100	120.45	122.64	109.96	121.06	124.54	87.35
80 - 90	100	69.75	47.96	42.74	51.81	22.91	6.86

Porcentaje de los escenarios futuros con base en el escenario actual. En el rango de 60-70 se cultiva el chile.

La superficie con este rango aumentará con respecto al escenario actual en 15.88 y 15.8% en las climatologías 2050 y 2070, respectivamente, en el RCP4.5. Este aumento significa mayor número de horas con temperatura óptima para el desarrollo del chile (Medina y Mena, 2016), ya que este cultivo es originario de regiones tropicales y subtropicales y requiere condiciones de temperatura cálida para su óptimo desarrollo (Madhavi *et al.*, 2016).

The behavior of the nocturnal temperature in the future implies that there will not be a good floral differentiation leading to a lower number of fruits per plant (Bosland and Votava, 2000). Table 4 shows the percentage of the number of hours with optimum temperature for the development of chili (18 to 28 °C) in the April-October crop cycle. The cultivation of chili is mainly planted in areas that have between 40 and 50% of the total number of hours in the agricultural cycle.

**Cuadro 4. Porcentaje del número de horas con temperatura de 18 a 28 °C en el ciclo abril-octubre y su porcentaje en los escenarios climáticos futuros en la región norte-centro.**

**Table 4. Percentage of the number of hours with temperature from 18 to 28 °C in the April-October cycle and its percentage in future climatic scenarios in the North-Central region.**

Horas (%)	Escenario actual	RCP 4.5			RCP 8.5		
		2030	2050	2070	2030	2050	2070
20 - 30	100	7.72	0.04	0.01	8.43	0.11	0.33
30 - 40	100	78.38	58.77	61.39	73.83	51.68	79.1
40 - 50	100	108.93	115.88	115.8	112.07	120.9	115.64
50 - 60	100	89.08	69.5	63.79	68.35	36.24	21.31

Porcentaje de los escenarios futuros con base en el escenario actual. En el rango de 40-50 se cultiva el chile.

Respecto al porcentaje del número de horas arriba del umbral superior (32 °C), el chile se cultiva en zonas 0 y 10% del total de horas en el ciclo de cultivo, esta área disminuirá hasta 47.12% en la climatología 2070 del RCP 4.5 y aumentará la de 10 a 20% hasta 21.95% en la misma climatología; es decir, mayor número de horas con estrés por temperaturas altas (Cuadro 5). Hay reportes que temperatura arriba de 30 °C tiene efecto sobre la formación del polen y su viabilidad ocasionando esterilidad (Cochran, 1938; Gunawardena y De Silva, 2014).

The surface with this range will increase with respect to the current scenario in 15.88 and 15.8% in climatologies 2050 and 2070, respectively, in RCP 4.5. This increase means a greater number of hours with optimal temperature for the development of chili (Medina and Mena, 2016), since this crop originates in tropical and subtropical regions and requires warm temperature conditions for optimal development (Madhavi *et al.*, 2016).

En cuanto al umbral inferior de 15 °C, este cultivo se planta en regiones con 20 a 40% del número total de horas en el ciclo de cultivo. Disminuirá la superficie del rango 20 a 30 y 30 a 40% hasta 61.29% en la climatología 2070 RCP 4.5 y aumentará la de 10 a 20%, esto indica que habrá menor número de horas debajo de este umbral (Cuadro 6), esto será favorable para el cultivo de chile, ya que temperatura inferior a 15°C afectan una variedad de funciones fisiológicas, el crecimiento se retrasa y el rendimiento se reduce (Mercado *et al.*, 1997; Gunawardena y De Silva, 2014).

As for the percentage of the number of hours above the upper threshold (32 °C), chili is mainly cultivated in areas that have between 0 and 10% of the total number of hours in the growing cycle, this area will decrease to 47.12% in climatology 2070 of RCP 4.5 and increase it from 10 to 20% to 21.95% in the same climatology, i.e., higher number of hours with high temperature stress (Table 5). There are reports that temperatures above 30 °C have a great effect on pollen formation and their viability leading to sterility (Cochran, 1938, Gunawardena and De Silva, 2014).

**Cuadro 5. Porcentaje del número de horas con temperatura >32 °C en el ciclo abril-octubre y su porcentaje en los escenarios climáticos futuros en la región norte-centro.**

**Table 5. Percentage of the number of hours with temperature >32 °C in the April-October cycle and its percentage in future climatic scenarios in the North-Central region.**

Horas (%)	Escenario actual	RCP 4.5			RCP 8.5		
		2030	2050	2070	2030	2050	2070
0 - 10	100	83.37	61.79	52.88	81.66	56.06	28.89
10 - 20	100	116.99	120.76	121.95	123.11	148.02	142.71
20 - 30	100	263.28	571.83	679.3	249.72	462.51	719.8
30 - 40	100	682.95	3 480.19	5 718.72	615.01	3 990.63	17 360.64

Porcentaje de los escenarios futuros con base en el escenario actual. En el rango 0-10 se cultiva el chile.

**Cuadro 6. Porcentaje del número de horas con temperatura <15 °C en el ciclo abril-octubre y su porcentaje en los escenarios climáticos futuros en la región norte-centro.**

**Table 6. Percentage of the number of hours with temperature <15 °C in the April-October cycle and its percentage in future climatic scenarios in the North-Central region.**

Horas (%)	Escenario actual	RCP 4.5			RCP 8.5		
		2030	2050	2070	2030	2050	2070
0 - 10	100	187.21	357.68	419.81	179.13	320.66	550.28
10 - 20	100	120.81	122.94	123.89	123.06	138.25	140.76
20 - 30	100	107.72	92.6	83.51	109.16	86.95	49.2
30 - 40	100	61.51	43.18	38.71	58.28	43.11	29.08
40 - 50	100	76.66	43.42	31.27	79.61	45.93	9.36
50 - 60	100	35.78	2.69	0.75	35.84	2.75	0.01

Porcentaje de los escenarios futuros con base en el escenario actual. En el rango de 20-30 y 30-40 se cultiva el chile.

En cuanto a la temperatura nocturna, el chile se cultiva principalmente en regiones con un porcentaje entre 10 y 30% de horas con temperatura nocturna dentro del rango óptimo (15 a 17.5 °C), disminuirá la superficie del rango 10 a 20% hasta 59.92% en la climatología 2070 y su lugar lo tomará el rango de 20 a 30% que, aunque disminuirá 8.21% en la climatología 2070 en el RCP 4.5, estará en las zonas donde actualmente se cultiva chile, esto significa que esas zonas tendrán un mayor número de horas con temperatura nocturna óptima (Cuadro 7).

As regards the lower temperature threshold (15 °C), this crop is mainly grown in regions with 20 to 40% of the total number of hours in the growing cycle. It will decrease the area from 20 to 30 and 30 to 40% to 61.29% in climatology 2070 of RCP 4.5 and increase from 10 to 20%, this indicates that there will be fewer hours below this threshold (Table 6), this will be favorable for chili cultivation, since temperatures below 15 °C affect a variety of physiological functions, growth is normally delayed and yield is reduced (Mercado *et al.*, 1997; Gunawardena and De Silva, 2014).

**Cuadro 7. Porcentaje del número de horas con temperatura nocturna de 15 a 17.5 °C en el ciclo abril-octubre y su porcentaje en los escenarios climáticos futuros en la región norte-centro.**

**Table 7. Percentage of the number of hours with a night temperature of 15 to 17.5 °C in the April-October cycle and its percentage in future climatic scenarios in the North-Central region.**

Horas (%)	Escenario actual	RCP 4.5			RCP 8.5		
		2030	2050	2070	2030	2050	2070
0 - 10	100	39.81	5.92	1.96	40.4	5.93	0.05
10 - 20	100	66.95	45.93	40.08	65.1	46.25	27.56
20 - 30	100	103.78	97.15	91.79	105.9	95.93	68.43
30 - 40	100	158.77	179.33	181.07	160.12	188.72	196.61
40 - 50	100	160.5	353.49	448.72	149.94	324.12	697.94
50 - 60	100	113.98	139.17	150.33	108.83	133.98	200.25
60 - 70	100	242.99	375.77	343.91	237.47	292.27	393.3

Porcentaje de los escenarios futuros con base en el escenario actual. En el rango 10-20 y 20-30 se cultiva el chile.

Para el umbral superior de temperatura nocturna (18°C), se encontró que donde se cultiva chile se tiene entre 10 y 30% de horas con temperatura arriba del umbral, en el futuro, disminuirá la superficie del rango de 10 a 20% hasta en 58.53% en la climatología 2070 y aumentará la del rango de 20 a 30%, hasta en 10.23% en la climatología 2070, del RCP 4.5 (Cuadro 8), el comportamiento de la temperatura nocturna en el futuro implica que no habrá una buena diferenciación floral lo que lleva a un menor número de frutos por planta (Bosland y Votava, 2000).

In terms of night temperature, chili is cultivated mainly in regions with a percentage between 10 and 30% of hours with night temperatures within the optimum range (15 to 17.5 °C), it will decrease the surface area from 10 to 20% to 59.92 % in the climatology 2070 and its place will take the range of 20 to 30% that, although it will decrease 8.21% in the climatology 2070 in RCP 4.5, will be in the areas where chili is currently cultivated, this means that those areas will have a greater number of hours with optimal night temperature (Table 7).

**Cuadro 8. Porcentaje del número de horas con temperatura nocturna mayor de 18 °C en el ciclo abril-octubre y su porcentaje en los escenarios climáticos futuros en la región Norte-Centro.**

**Table 8. Percentage of the number of hours with night temperatures over 18 °C in the April-October cycle and their percentage in future climatic scenarios in the North-Central region.**

Horas (%)	Escenario actual	RCP 4.5			RCP 8.5		
		2030	2050	2070	2030	2050	2070
0 - 10	100	61.92	35.1	27.82	62.47	37.68	14.17
10 - 20	100	77.29	47.27	41.47	73.39	42.9	29.83
20 - 30	100	111.9	118.48	110.32	117.77	114.92	62.77
30 - 40	100	94.63	99.13	101.16	100.39	107.45	123.13
40 - 50	100	177.47	167.58	165.88	170.05	200.19	186.44
50 - 60	100	282.87	533.11	578.79	266.62	466.62	544.65
60 - 70	100	131.45	387.34	489.07	129.6	333.56	768.07
70 - 80	100	131.66	169.47	247.82	129.08	164.91	550.18
80 - 90	100	106.5	133.66	135.62	102.35	130.06	197.61
90 - 100	100	230.1	385.96	458.32	227.29	365.18	603.18

Porcentaje de los escenarios futuros con base en el escenario actual. En el rango 10-20 y 20-30 se cultiva el chile.

Por último, donde se cultiva chile hay entre 10 y 30% de horas con temperatura nocturna abajo del umbral inferior (10 °C); de acuerdo a los escenarios climáticos futuros, disminuirá la superficie con número de horas del rango de 10 a 20% y también disminuirá la superficie del rango de 20 a 30% hasta 55.16% en la climatología 2070 del RCP 4.5, que indica que en zonas donde se cultiva chile habrá menos horas con temperatura nocturna abajo del umbral inferior (Cuadro 9), lo cual indica que habrá menos horas con temperatura nocturna abajo del umbral inferior, esto implica que el cultivo tendrá mayor producción y viabilidad del polen (Shaked *et al.*, 2004).

Las tendencias observadas de aumento o disminución de las superficies de diferentes rangos de temperatura en el RCP 4.5, se observan también en el RCP 8.5 pero de una manera más acentuada. Esto se debe que el RCP 4.5 es un escenario con emisiones intermedias de GEI, mientras que el RCP 8.5 es un escenario con emisiones de GEI altas, que provocará un mayor aumento de la temperatura a nivel global (van Vuuren *et al.*, 2011).

El efecto del calentamiento global en los tres escenarios climáticos estudiados se observa de dos maneras diferentes, por un lado favorecerá al cultivo de chile con un aumento de la superficie (22.6%) con temperatura horaria dentro de los umbrales de desarrollo (15 a 32 °C) y un crecimiento (15.8%) dentro del rango de temperatura óptima (18 a 28 °C), pero limitada por el aumento (20.8%) de la superficie con temperatura horaria mayor al umbral superior (32 °C) y mayor a (18.5%) de la superficie con temperatura nocturna horaria mayor al umbral superior de temperatura nocturna (18 °C).

For the upper threshold of night temperature (18 °C), it was found that where chili is grown it has between 10 and 30% of hours with temperature above the threshold, in the future, the area of the range of 10 to 20% will decrease until in 58.53% in climatology 2070 and increase in the range of 20 to 30%, up to 10.23% in climatology 2070, in RCP 4.5 (Table 8), the behavior of the night temperature in the future implies that there will be no good floral differentiation leading to a lower number of fruits per plant (Bosland and Votava, 2000).

Finally, where chili is grown, it has between 10 and 30% of hours with night temperature below the lower threshold (10 °C); according to future climatic scenarios, will decrease the surface with the number of hours of the range of 10 to 20% and will mainly decrease the surface of the range of 20 to 30% to 55.16% in the climatology 2070 of RCP 4.5, which indicates that in areas where chili is cultivated there will be fewer hours with nocturnal temperature below the lower threshold (Table 9), which indicates that there will be fewer hours at night below the lower threshold, which implies that the crop will have greater pollen production and viability (Shaked *et al.*, 2004).

The observed trends of increasing or decreasing surfaces of different temperature ranges in RCP 4.5 are also observed in RCP 8.5 but in a more pronounced manner. This is because RCP 4.5 is a scenario with intermediate GHG emissions, while RCP 8.5 is a scenario with high GHG emissions, which will lead to a further rise in global temperature (van Vuuren *et al.*, 2011).

**Cuadro 9. Porcentaje del número de horas con temperatura nocturna menor de 10 °C en el ciclo abril-octubre y su porcentaje en los escenarios climáticos futuros en la región norte-centro.**

**Table 9. Percentage of the number of hours with a night temperature less than 10 °C in the April-October cycle and its percentage in the future climatic scenarios in the North-Central region.**

Horas (%)	Escenario actual	RCP 4.5			RCP 8.5		
		2030	2050	2070	2030	2050	2070
0 - 10	100	130.81	166.81	178.48	131.35	169.75	205.25
10 - 20	100	97.17	73.79	64.57	96.72	68.96	42.11
20 - 30	100	63.53	48.79	44.84	61.59	49.79	34.33
30 - 40	100	82.26	46.49	33.06	85.28	48.86	8.40
40 - 50	100	41.8	3.43	1.05	42.09	3.83	0.02
50 - 60	100	5.35	0.02	0.01	6.05	0.02	0

Porcentaje de los escenarios futuros con base en el escenario actual. En el rango 10-20 y 20-30 se cultiva el chile.

Todo esto en el RCP4.5 y en la climatología 2050, el estrés por alta temperatura es un estrés ambiental importante que limita el crecimiento de las plantas, el metabolismo y la productividad (Hasanuzzaman *et al.*, 2013), lo que repercutirá en la disminución del rendimiento debido al efecto negativo en los procesos de polinización y amarre de frutos (Bradley *et al.*, 1999; Peñuelas y Filella, 2001). Sin duda este último efecto es el que predominará, puesto que, aunque se tengan más horas con temperatura favorable, el daño por el aumento de las horas con estrés por temperatura alta es irreversible una vez que ha ocurrido (Taiz y Zeiger, 2006).

## Conclusiones

Se observa un efecto favorable del calentamiento atmosférico en el periodo histórico 1981-2010 en el norte-centro de México, al aumentar el número horas dentro del rango de temperaturas cardinales, que son favorables para el desarrollo de chile, de la misma manera disminución del número de horas abajo del umbral inferior de temperatura y de temperatura nocturna.

En el mismo periodo histórico se ha dado un efecto desfavorable al aumentar el número de horas con temperatura arriba del umbral superior de temperatura y arriba del umbral superior de temperatura nocturna, las cuales reducen la polinización, y aumentan el aborto de flores y frutos pequeños.

Considerando los efectos del calentamiento global en los escenarios climáticos futuros en los RCP 4.5 y 8.5, la superficie con porcentaje de horas con temperatura dentro de los rangos óptimos de desarrollo va continuar aumentando hacia el futuro, pero limitada por el aumento de la superficie con temperatura horaria mayor a los umbrales superiores óptimos en los mismos escenarios, lo que repercutirá principalmente en la disminución del rendimiento debido al efecto negativo en los procesos de polinización y amarre de frutos.

Las zonas con alto potencial de rendimiento de chile en los estados de Zacatecas, San Luis Potosí, Aguascalientes y Guanajuato serán más afectadas que las de los estados de Durango y Chihuahua.

The effect of global warming in the three future climatic scenarios studied is observed in two different ways, on the one hand it will favor the cultivation of chili with an increase in surface area (22.6%) with hourly temperature within the development thresholds (15 to 32 °C) and growth (15.8%) within the optimum temperature range (18 to 28 C), but limited by the increase (20.8%) of the surface with hourly temperature higher than the upper threshold (32 °C) and higher a (18.5%) of the surface with hourly nighttime temperature greater than the upper threshold of night temperature (18 °C).

All this in RCP 4.5 and in the 2050 climatology, high temperature stress is an important environmental stress that limits plant growth, metabolism and productivity (Hasanuzzaman *et al.*, 2013), which will affect the decrease of the yield due to the negative effect on the processes of pollination and fruit binding (Bradley *et al.*, 1999; Peñuelas and Filella, 2001). This last effect is undoubtedly the one that will predominate, since even though there are more hours with favorable temperatures, the damage caused by the increase in hours with high temperature stress is irreversible once it has occurred (Taiz and Zeiger, 2006).

## Conclusions

A favorable effect of the atmospheric warming in the historical period 1981-2010 in the central-north of Mexico is observed, as the number of hours within the range of cardinal temperatures increases, which are favorable for the development of chili, in the same way a decrease in the number hours below the lower temperature threshold and night temperature.

In the same historical period, there has been an unfavorable effect of increasing the number of hours with temperature above the upper temperature threshold and above the upper threshold of nocturnal temperature, which reduces pollination and increases the abortion of flowers and small fruits.

Considering the effects of global warming on future climatic scenarios in RCP 4.5 and 8.5, the area with percentage of hours with temperature within the optimum ranges of development is increasing towards the future, but limited by

## Literatura citada

- AAloni, B.; Pressman, E. and Karni, L. 1999. The effect of fruit load, defoliation and night temperature on the morphology of pepper flowers and on fruit shape. *Ann. Bot.* 83:529-534.
- Bakker, J. C. and van Uffelen, J. A. M. 1988. The effects of diurnal temperature regimes on growth and yield of sweet pepper. *Netherlands J. Agric. Sci.* 36:201-208.
- Bosland, P. W. and Votava, E. J. 2000. Peppers: vegetable and spice *Capsicums*. Crop Production Science in Horticulture 12. CAB International Publishing, Wallingford, England, UK. 204 p.
- Bradley, N. L.; Leopold, A. C.; Ross, J. and Huffaker, W. 1999. Phenological changes reflect climate change in Wisconsin. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 96:9701-9704.
- Cochran, H. L. 1938. A morphological study of flower and seed development in pepper. *J. Cochran Agric. Res.* 56:395-417.
- Erickson, A. N. and Markhart, A. H. 2001. Flower production, fruit set, and physiology of bell pepper during elevated temperature and vapor pressure deficit. *J. Am. Soc. Hortic. Sci.* 126(6):697-702.
- Evans, L. T. 1993. Crop evolution, adaptation and yield. Cambridge University Press. 71 p.
- Fritz, J. O.; Vanderlip, R. L.; Heiniger, R. W. and Abelhalim, A. Z. 1997. Simulating forage sorghum yields with SORKAM. *Agron. J.* 89:64-68.
- Gunawardena, M. D. M. and De Silva, C. S. 2015. Identifying the impact of temperature and water stress on growth and yield parameters of chilli (*Capsicum annum* L.). *OUSL J.* 7:25-42.
- Hasanuzzaman, M.; Nahar, K.; Alam, M. M.; Roychowdhury, R. and Fujita, M. 2013. *Int. J. Mol. Sci.* 14:9643-9684.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2014. Climate Change 2014: synthesis report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.; Pachauri, K. and Meyer, L.A. (Eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 p.
- Laborde, C. J. A. y Pozo, C. O. 1984. Presente y pasado del chile en México. Instituto Nacional de Investigaciones Agrícolas (INIA). México. Publicación especial núm. 85. 80 p.
- Long, S. J. 1982. Presente y pasado del chile en México. *SARH-INIA. México, D. F.* 8(8):48- 49.
- Madhavi, R. K.; Shivashankara, K. S.; Geetha, G. A. and Pavithra, K. C. 2016. *Capsicum* (hot pepper and bell pepper). In: Srinivasa, N. K.; Shivashankara, K. S. and Laxman, R. H. (Eds.) *Abiotic stress physiology of horticultural crops*. Springer India. 151-166 pp.
- Medina, G. G. y Mena C. J. 2016. Cambio climático y sus efectos en la producción de chile en el norte-centro de México. In: Sexto foro para productores de chile. Zacatecas, México. 1-15 pp.
- Mercado, J. A.; Reid, M. S.; Valpuesta, V. and Quesada, M. A. 1997. Metabolic changes and susceptibility to chilling stress in *Capsicum annum* plants grown at suboptimal temperature. *Functional Plant Biol.* 24(6):759-767.
- Muñoz, F. I. y Pinto, C. B. 1970. Taxonomía y distribución geográfica de los chiles cultivados en México. *Revista el Campo* Núm. 15. INIA-SAG. México. 3-12 pp.
- the increase of the surface with temperature hour higher than the optimal upper thresholds in the same scenarios, which will affect the yield decrease due to the negative effect on the pollination and fruit tie-down processes.
- Areas with high chili yield potential in the states of Zacatecas, San Luis Potosí, Aguascalientes and Guanajuato will be more affected than those in the states of Durango and Chihuahua.

*End of the English version*



- Olareweju, J. D. 1988. Effect of night temperature on fruit set and development in sweet pepper (*Capsicum annum* L.). *Haryana J. Hortic. Sci.* 18:285-288.
- Peñuelas, J. and Filella, I. 2001. Phenology: responses to a warming world. *Science.* 294(5543):793-795.
- Pozo, C. O. 1981. Descripción de tipos y cultivares de chile (*Capsicum* spp.) en México. Folleto técnico número 77. INIA-SARH. 40 p.
- Rylski, I. and Spigelman, M. 1982. Effects of different diurnal temperature combinations on fruit-set of sweet pepper. *Sci. Hortic.* 17:101-106.
- Ruiz-Corral, J. A.; Medina-García, G.; Rodríguez-Moreno, V. M.; Sánchez-González, J. J.; Villavicencio, G. R.; Durán, P. N.; Grageda, G. J. y García, R. J. E. 2016. Regionalización del cambio climático en México. *Rev. Mex. Cienc. Agríc. Pub. Esp. Núm.* 13:2451-2464.
- Saha, S. R.; Hossain, M. M.; Rahman, M. M.; Kuo, C. G. and Abdullah, S. 2010. Effect of high temperature stress on the performance of twelve sweet pepper genotypes. *Bangladesh J. Agric. Res.* 35(3):525-534.
- Sanders, D. C.; Kirk, H. J. and Van der Brink, C. 1980. Growing degree days in North Carolina. AG-236. North Carolina Agricultural Extension Service, Raleigh.
- Shaked, R.; Rosenfeld, K. and Pressman, E. 2004. The effect of low night temperatures on carbohydrates metabolism in developing pollen grains of pepper in relation to their number and functioning. *Sci. Hortic.* 102:29-36.
- SIACON (Sistema de Información Agropecuaria de Consulta) 1980-2014. SAGARPA. 2015. México, D. F. <http://www.siap.gob.mx/siacon>.
- Snyder, R. L. 1985. Hand calculating degree-days. *Agric. For. Meteorol.* 35:353-358.
- Taiz, L. and Zeiger, E. 2006 *Plant physiology*. Fourth edition. Sinauer Associates. Sunderland, MA. 764 p.
- Van Vuuren, D. P.; Edmonds, J.; Kainuma, M.; Riahi, K.; Thomson, A.; Hibbard, K.; Hurtt, G. C.; Kram, T.; Krey, V.; Lamarque, J. F. and Masui, T. 2011. The representative concentration pathways: an overview. *Climatic Change.* 109(1):5-31.
- Walton, D.; Meyerson J. and Neelin J. D. 2013. Accessing, Downloading, and Viewing CMIP5 Data. *Earth System Grid Federation.* 25 p.