

Influence of climate change on thermal requirements of cactus pear (*Opuntia* spp.) in Central-Northern of Mexico

Influencia del cambio climático en los requerimientos térmicos del nopal tunero (*Opuntia* spp.) en el Centro-Norte de México

Medina-García, G.¹, Zegbe, J. A.^{1*}, Ruiz-Corral, J. A.², Casa-Flores, J.I.¹, Rodríguez-Moreno, V. M.³

¹INIFAP Campo Experimental Zacatecas, Km 24.5 Carretera Zacatecas-Fresnillo, Calera, Zac., México.

²Centro Universitario de Ciencias Biológicas y Agropecuarias-Universidad de Guadalajara. Camino Ing. Ramón Padilla Sánchez núm. 2100, Predio Las Agujas, Nextipac, Zapopan, Jalisco, México.

³INIFAP Campo Experimental Pabellón, Carretera Aguascalientes-Zacatecas km 32.5, Pabellón de Arteaga, Ags., México.

Cite this paper/Como citar este artículo: Medina-García, G., Zegbe, J. A., Ruiz-Corral, J. A., Casa-Flores, J.I., Rodríguez-Moreno, V. M. (2021). Influence of climate change on thermal requirements of cactus pear (*Opuntia* spp.) in Central-Northern of Mexico. *Revista Bio Ciencias* 8, e1007. <https://doi.org/10.15741/revbio.08.e1007>



ABSTRACT

In Mexico, cactus pear (*Opuntia* spp.) crop has a strong cultural tradition. This country is considered the origin center and domestication of the genus *Opuntia*. In the north-central of the country, on average, more than 45, 000 ha are annually harvested. Although cactus pear is a tolerant species to adverse environmental conditions, its productivity can be negatively affected by biotic and abiotic factors during its development. The objective of this work was to know the effect of climate change on the thermal range of cactus pear grown in Central-North Mexico. A historical analysis was done on the number of hour variation with temperature inside and outside of the cactus pear thermal range. A similar analysis was done for the 2030, 2050, and 2070 climate scenarios on Representative Concentration Routes

Article Info/Información del artículo

Received/Recibido: June 28th 2020.

Accepted/Aceptado: January 29th 2021.

Available on line/Publicado: February 04th 2021.

RESUMEN

En México, el cultivo del nopal tunero (*Opuntia* spp.) tiene una larga tradición cultural. Este país es considerado como el centro de origen y domesticación del género *Opuntia*. En el Centro Norte del país, en promedio, más de 45, 000 ha son cosechadas anualmente. Sin embargo, aunque el nopal es una especie tolerante a condiciones ambientales adversas, su productividad puede ser afectada negativamente por factores bióticos y abióticos durante su desarrollo. El objetivo de este trabajo fue conocer el efecto del cambio climático sobre el rango térmico del nopal tunero cultivado en el Centro-Norte de México. Se hizo un análisis histórico sobre la variación del número de horas con temperatura dentro y fuera del rango térmico para el nopal. También se hizo un análisis similar para los escenarios climáticos 2030, 2050 y 2070 en las rutas de concentración representativas (RCP, por sus siglas en inglés) 4.5 y 8.5. El cambio climático tendrá poco efecto en el número de horas con temperatura media anual en el rango óptimo para el desarrollo de nopal tunero (14 a 19 °C) y en el número de horas con temperatura media en el mes de enero para el

*Corresponding Author:

Jorge A. Zegbe. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Campo Experimental Zacatecas, Km 24.5 Carretera Zacatecas-Fresnillo, Calera, Zac., México. Phone: (800) 0882 222 Ext. 82314. E-mail: zegbe.jorge@inifap.gob.mx.

(RCP, for its acronym in English) 4.5 and 8.5. Climate change will have little effect on the number of hours with average annual temperature in the optimal range for cactus pear development (14 to 19 °C) and on the number of hours with an average temperature in January for the optimal range (10 a 14 °C). In the first case, the cultivated area with that temperature (14 a 19 °C) would decrease only by 4 % and 15.4 % for 2070 under RCP 4.5 and 8.5 scenarios, respectively. In the second one, the cultivated area with that optimum temperature (10 a 14 °C) would increase by 9.9 % and 13.2 % for 2070 under RCP 4.5 and 8.5 scenarios, respectively.

KEY WORDS

Opuntia spp., global warming, RCP, hourly temperature.

Introduction

Cactus pear (*Opuntia* spp.) is a xerophyte plant cultivated in marginal arid and semi-arid regions of Mexico and similar agro-ecosystems around the world. This plant has several uses such as a vegetable and fruit for human consumption, cattle feed in drought times, industrial uses, as well as to minimize soil erosion (Varela-Gómez *et al.*, 2014, Inglese *et al.*, 2017).

Mexico is the main producer of fruit, harvesting approximately 43 % of the annual world production estimated at 1,060,000 t in an area of 100,000 ha (Potgieter & D'Aquino, 2017). Planted surface in Mexico with cactus pear in 2019 was 45, 746 ha under rainfed agriculture, mainly in the states of Mexico 35.4 %, Zacatecas 24.7 %, Puebla 12.2 %, Hidalgo 9.6 %, San Luis Potosí 6.4 %, Jalisco 4.5 %, Guanajuato 3.9 %, Tamaulipas 1.4 %, and Querétaro 1.2 % (SIAP, 2020). These states are located in the north-central region of the country, known as the Mexican Altiplano.

Opuntia species have developed anatomical, morphological and physiological adaptations to survive and grow in arid environments with severe water stress that limits the survival of other plant species (Prat & Franck, 2017). Cactus pear is a plant with crassulacean acid metabolism (CAM), which is characterized by nocturnal carbon fixation and water use when the

rango óptimo (10 a 14 °C). En el primer caso, la superficie cultivada con esa temperatura óptima sólo disminuiría 4 % y 15.4 % para el año 2070 bajo los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5, respectivamente. En el segundo caso, la superficie de los municipios con esa temperatura óptima aumentaría 9.9 % y 13.2 % para el año 2070 bajo los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5, respectivamente.

PALABRAS CLAVE

Opuntia spp., calentamiento global, RCP, temperatura horaria.

Introducción

El nopal tunero (*Opuntia* spp.) es una planta xerófila cultivada en regiones áridas y semiáridas marginales de México y en agro-ecosistemas similares del mundo. Esta planta tiene diferentes usos tanto como consumo humano, como hortaliza y fruta, como alimento para ganado en épocas de sequía, usos industriales, así como para minimizar la erosión del suelo (Varela-Gómez *et al.*, 2014, Inglese *et al.*, 2017).

México es el principal productor de tuna, cosechando aproximadamente el 43 % de la producción mundial anual estimada en 1,060,000 t en una superficie de 100,000 ha (Potgieter & D'Aquino, 2017). La superficie plantada en México con nopal tunero en 2019 fue de 45, 746 ha bajo condiciones de temporal, principalmente en los estados de México 35.4 %, Zacatecas 24.7 %, Puebla 12.2 %, Hidalgo 9.6 %, San Luis Potosí 6.4 %, Jalisco 4.5 %, Guanajuato 3.9 %, Tamaulipas 1.4 %, y Querétaro 1.2 % (SIAP, 2020). Estos estados se encuentran en la región Centro Norte del país, conocida como Altiplano Mexicano.

Las especies de *Opuntia*, han desarrollado adaptaciones anatómicas, morfológicas y fisiológicas para sobrevivir y crecer en ambientes áridos con severo estrés hídrico que limita la sobrevivencia de otras especies vegetales (Prat & Franck, 2017). El nopal es una planta con metabolismo del ácido crasuláceo (CAM, por sus siglas en inglés), el cual está caracterizado por la fijación nocturna de carbono y uso del agua, cuando la temperatura es más baja y la humedad relativa es generalmente más alta que la diurna (Cushman & Bohert, 1999; Nobel & Bobich, 2002). Así, durante el curso diurno, el uso del agua vía transpiración

temperature is lower and relative humidity is generally higher than during the day (Cushman & Bohert, 1999; Nobel & Bobich, 2002). Thus, during the daytime, water use via transpiration in CAM plants is three to five times lower than C_4 and C_3 plants, respectively (Nobel, 1988).

In concordance with several authors, Ruiz *et al.* (2013) point out that *Opuntia* genus is found from sea level to an altitude of 4,700 m, although the optimal altitude is 1,700 to 2,300 masl. The thermal range for this species is 6 to 36 °C, with an optimum between 15 and 19 °C. *Opuntia* can endure temperatures of up to 65 °C for one hour. Meanwhile, this species dies with temperatures of -5 to -8 °C. Besides, it requires rainfall between 200 to 750 mm per year, although the optimum is 350 to 700 mm. In fact, in the native area of cactus pear in the central highlands of Mexico (altitude between 1,800 and 2,200 masl), rainfall is less than 500 mm, the average annual temperature varies between 16 and 18 °C, and the maximum daytime temperature in the hottest month does not exceed 35 °C (Pimienta-Barrios, 1990).

Although physiological and morphological adaptations together make cactus pear successful in dry environments, and it could face climate change, it is imperative to study the effect that global warming could or could not have on the cactus pear crops (Kumar *et al.*, 2018).

However, although cactus pear is a species that has a broad range of adaptation (Ruiz *et al.*, 2013), its productivity can be variable due to both biotic and abiotic factors that occur during crop development. Extreme temperatures and water availability are two of the abiotic stress factors that limit crop growth and development (Medina-García *et al.*, 2016).

Mexican agricultural areas temperature has significantly increased since the 1990s (Ruiz *et al.*, 2011; Medina-García *et al.*, 2016). This temperature increase brings with it modifications in agro-climatic variables such as the accumulation of heat and cold winter units that limit the productivity of mainly deciduous fruit trees (Medina-García *et al.*, 2019a).

With climate change, it is expected that by 2050 the average temperature of the earth will have increased by 2 to 5 °C or more, according to the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC, 2014). Currently, climate change is one of the main circumstances facing

en las plantas CAM es de tres a cinco veces menor que plantas C_4 y una C_3 , respectivamente (Nobel, 1988).

De acuerdo a diferentes autores citados por Ruiz *et al.* (2013), al género *Opuntia* se le encuentra desde el nivel del mar hasta una altitud de 4,700 m, aunque la altitud óptima es de 1,700 a 2,300 masl. El rango térmico para esta especie es de 6 a 36 °C, con un óptimo entre 15 y 19 °C. El nopal puede soportar temperaturas hasta de 65 °C por una hora. En tanto, esta especie muere con temperaturas de -5 a -8 °C. Requiere precipitaciones entre 200 a 750 mm anuales, aunque el óptimo es de 350 a 700 mm. De hecho, en el área nativa del nopal en la altiplanicie central de México (altitud entre 1,800 y 2,200 masl, la lluvia es menor a 500 mm, la temperatura media anual varía entre 16 y 18 °C, y la temperatura máxima durante el día en el mes más caliente no excede 35 °C (Pimienta-Barrios, 1990).

Si bien, las adaptaciones fisiológicas y morfológicas en conjunto hacen que el nopal sea exitoso en los ambientes secos, y que podría afrontar al cambio climático, es imperativo estudiar el efecto que el calentamiento global podría o no tener en el cultivo de nopal tunero (Kumar *et al.*, 2018).

Sin embargo, aunque el nopal es una especie que tiene un amplio rango de adaptación (Ruiz *et al.*, 2013), su productividad puede ser variable debido tanto a factores bióticos como abióticos que se presentan durante el desarrollo del cultivo. Temperaturas extremas y la disponibilidad de agua son dos de los factores de estrés abiótico que limitan el crecimiento y desarrollo de los cultivos (Medina-García *et al.*, 2016).

La temperatura de las áreas agrícolas de México se ha incrementado de manera perceptible desde la década de los años noventa del siglo pasado (Ruiz *et al.*, 2011; Medina-García *et al.*, 2016), este incremento de la temperatura trae consigo modificaciones en variables agroclimáticas como puede ser la acumulación unidades calor y de frío invernal que limitan la productividad principalmente de árboles frutales caducifolios (Medina-García *et al.*, 2019a).

Con el cambio climático se espera que para el año 2050 la temperatura promedio de la tierra se haya incrementado entre 2 y 5 °C, o más, de acuerdo al Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC, 2014). Actualmente, el cambio climático representa una de las principales circunstancias que enfrenta la agricultura,

agriculture, due to the changes it causes in weather patterns and therefore in the agro-climatology related to the management of agricultural activities. Therefore, it is important to know the climatic conditions of the cactus pear development and its possible influence on its production potential.

This work aims to know the effect of climate change on the thermal range of the cactus pear cultivated in the north-central region of Mexico.

Material and Methods

The study area included the main cactus pear-producing states in north-central Mexico: Zacatecas, San Luis Potosí, Aguascalientes, State of Mexico, Puebla, Hidalgo, Guanajuato and Jalisco (Figure 1). Daily maximum and minimum temperature data of the National Meteorological Service climate stations were used. A total of 244 stations with more than 30 years and more than 90 % of data were selected.

With the daily maximum and minimum temperature data, hourly data (Snyder, 1985) was generated from the entire historical data series of the stations. To validate the data estimation, daily maximum and minimum temperature data from an automatic weather station were used and

debido a las alteraciones que causa en los patrones climáticos y por tanto en la agroclimatología relacionada con el manejo de las actividades agrícolas. Por lo cual es importante conocer las condiciones climáticas de desarrollo del nopal tunero y su posible influencia en su potencial de producción.

El objetivo de este trabajo fue conocer el efecto del cambio climático, sobre el rango térmico del nopal tunero cultivado en el Centro-Norte de México

Material y Métodos

El área de estudio comprendió los principales estados productores de nopal tunero del centro norte de México: Zacatecas, San Luis Potosí, Aguascalientes, Estado de México, Puebla, Hidalgo, Guanajuato y Jalisco (Figura 1). Se utilizaron datos diarios de temperatura máxima y temperatura mínima de las estaciones de clima del Servicio Meteorológico Nacional. Se seleccionaron 244 estaciones con más de 30 años y más de 90 % de datos.

Con los datos diarios de temperatura máxima y mínima, se generaron datos horarios (Snyder, 1985) de toda la serie histórica de datos de las estaciones. Para validar la estimación de los datos, se utilizaron datos diarios de temperatura máxima y mínima de una estación de clima

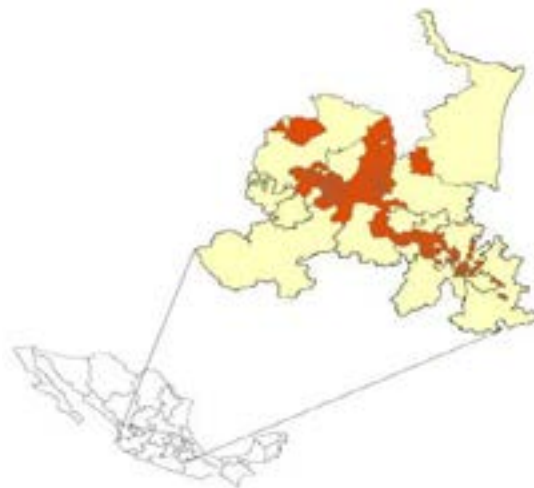


Figure 1. Main cactus pear fruit-producing states and municipalities in Mexico.

Figura 1. Principales estados y municipios productores de tuna en México.

compared with their real hourly data. With the estimated data, the number of hours in which the temperature was inside and outside of the optimal ranges of cardinal temperatures for cactus pear (Table 1) during the annual crop cycle and in January was counted (Medina-García *et al.*, 2019b). The average number of hours in each range per month was obtained for each year (1981-2010). With these data, trend analysis was done, using the non-parametric Mann-Kendall test (Mann, 1945; Kendall, 1975), since it is considered the most appropriate for trend analysis in climatological time series (Miró *et al.*, 2009; Ahmed *et al.*, 2014; Melo *et al.*, 2015) and was complemented with the Sen's slope estimator test (Sen, 1968). For this, the Makesens macro code, developed at the Finnish Meteorological Institute, was used (Salmi *et al.*, 2002).

To generate maps with the number of hours of temperature of each range, regression models were estimated for the crop cycle. For that purpose, 61 stations were selected at national level covering different environments. There were obtained the hourly temperatures per day of each one of the 61 stations, it was obtained the number of hours of temperature for each range and they were related to the average maximum and minimum temperature in the same crop period. This way, it was obtained a model for each range for the annual crop cycle and for the month of January.

To estimate the effect of climate change on the number of hours in and out of the cardinal temperatures, the climate change information system of the National Research Institute in Forestry, Agriculture and Livestock (INIFAP)-Mexico 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 Pathway (RCP) 4.5 and 8.5 of greenhouse gases (GHG). These were

automática, y se compararon con sus datos horarios reales. Con los datos estimados se contabilizó el número de horas en que la temperatura estuvo dentro y fuera de los rangos óptimos de las temperaturas cardinales para nopal tunero (Tabla 1) durante el ciclo de cultivo anual y en el mes de enero (Medina-García *et al.*, 2019b). Se obtuvo el número de horas promedio de cada rango por mes para cada año (1981-2010), con estos datos se hicieron análisis de tendencias, para lo cual se utilizó la prueba no paramétrica de Mann-Kendall (Mann, 1945; Kendall, 1975), ya que se considera la más adecuada para el análisis de tendencias en series temporales climatológicas (Miró *et al.*, 2009; Ahmed *et al.*, 2014; Melo *et al.*, 2015) y se complementó con la estimación Sen de pendiente de la tendencia (Sen, 1968) para esto se utilizó la macro Makesens, desarrollada en el Finnish Meteorological Institute (Salmi *et al.*, 2002).

Para generar mapas con el número de horas de temperatura de cada rango se estimaron modelos de regresión para el ciclo de cultivo. Para tal efecto, 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 obtuvo 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 anual y para el mes de enero.

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 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 (GHG) por sus siglas en inglés. Los cuales fueron obtenidos a partir de información del portal de datos de Cambio Global de WorldClim con los que se

Table 1.
Threshold and optimum values of cardinal temperatures for cactus pears cultivated in the study region.

Tabla 1.
Valores umbrales y óptimos de temperaturas cardinales para nopal tunero cultivado en la región de estudio.

Temperature °C	Marginal	Sub optimal	Optimal	Sub optimal	Marginal
Annual mean	< 13	13 - 14	14 - 19	19 - 21	> 21
January mean		< 10	10 - 14	> 14	

obtained from information from the WorldClim's Global Change data portal with which an assembly model was generated comprising by 11 scaled-down and calibrated general circulation models (GCMs) (Walton *et al.*, 2013) and 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).

An intermediate emissions RCP was used (4.5) which is considered reliable with a future with relatively ambitious emissions reductions and a high emissions RCP (8.5) which is consistent with a future without policy changes to reduce emissions (Van Vuuren *et al.*, 2011). These scenarios were used to make the projections. Maximum and minimum temperature values from the years 2041 to 2080 were used. The monthly data were used to obtain the annual data for the climate scenarios 2021-2040, 2041-2060 and 2061-2080, hereinafter referred to as climatologies or years 2030, 2050 and 2070 respectively.

Results and Discussion

Retrospective analysis

In the estimated hourly data validation of an automatic weather station and their respective real hourly data, they were adjusted to linear regression (R^2

generó un modelo ensamble integrado por 11 modelos de circulación general (GCMs) reducidos en escala y calibrados (Walton *et al.*, 2013) y 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 considerado 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 2021-2040, 2041-2060 y 2061-2080, en adelante referidos como climatologías o años 2030, 2050 y 2070 respectivamente.

Resultados y Discusión

Análisis retrospectivo

En la validación de los datos horarios estimados de una estación meteorológica automática y sus respectivos datos horarios reales, se ajustaron a una regresión lineal con $R^2 = 90\%$, intercepto igual a cero y valor de la pendiente igual a uno (Figura 2) (Fritz *et al.*, 1997).

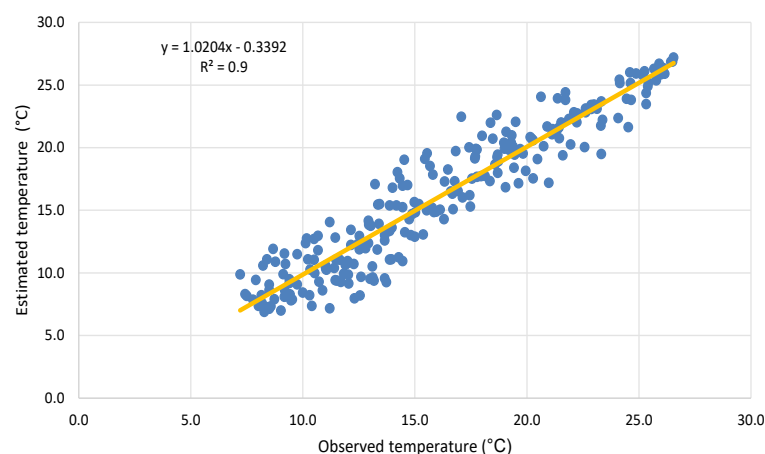


Figure 2. Model 1:1 with hourly data of observed and estimated temperature.

Figura 2. Modelo 1:1 con datos horarios de temperatura observada y estimada.

= 90 %, intercept equal to zero and slope value equal to one) (Figure 2) (Fritz *et al.*, 1997).

With the hourly data, it was estimated the number of hours in which the temperature was found inside and outside the optimal ranges of cardinal temperatures for the development of cactus pear in the annual crop cycle. The historical trend analysis for the years 1981 to 2010 (considering the 244 stations) is presented in Table 2.

The number of hours within the optimal temperature range for the development of cactus pear (14-19 °C), did not show a significantly defined trend, that is, the number of hours with appropriate temperature for this crop remained without statistically significant changes in the study period. The lower marginal temperature (< 13 °C), presented a tendency to decrease, but not significantly; while the upper marginal temperature (> 21 °C) presented a tendency to increase significantly (Table 2). This suggested that only the upper marginal temperature could negatively affect the development of this crop when it exceeds 23 °C (Inglese *et al.*, 2017).

Concerning the average temperature in January, which is important for cactus pear, since in regions with severe frost, it negatively affects this crop (Nobel, 1996; Nobel & Bobich, 2002), the analysis revealed that the number of hours in the optimal temperature range for the month of January (10-14 °C), those below (< 10 °C) and above (> 14 °C) to the optimal range in the month

Con los datos horarios se estimó el número de horas en que la temperatura se encontró dentro y fuera de los rangos óptimos de temperaturas cardinales para el desarrollo del nopal tunero en el ciclo de cultivo anual. El análisis de tendencias históricas de los años 1981 a 2010 (considerando las 244 estaciones) se presenta en la Tabla 2.

El número de horas dentro del rango de temperatura óptima para el desarrollo del nopal tunero (14 – 19 °C), no tuvo una tendencia significativamente definida, es decir, el número de horas con temperatura apropiada para este cultivo se mantuvo sin cambios estadísticamente significativos en el periodo de estudio. La temperatura marginal inferior (< 13 °C), presentó una tendencia a disminuir, pero no significativamente; mientras que la temperatura marginal superior (> 21 °C) presentó una tendencia a incrementarse significativamente (Tabla 2). Lo anterior sugirió que sólo la temperatura marginal superior podría afectar negativamente el desarrollo de este cultivo cuando ésta exceda los 23 °C (Inglese *et al.*, 2017).

En cuanto a la temperatura media del mes de enero, la cual es importante para el nopal tunero, ya que en regiones con heladas severas, afectan negativamente a este cultivo (Nobel, 1996; Nobel & Bobich, 2002), el análisis reveló que el número de horas en el rango de temperatura óptima para el mes de enero (10 - 14 °C), aquellas abajo (< 10 °C) y superiores (> 14 °C) al rango óptimo en el mes de enero, independientemente del valor de la pendiente, resultaron sin tendencia significativa en el periodo de 1981 a 2010 (Tabla 2). Estos resultados indicaron que el número de

Table 2.
Mann-Kendall test and Sen's slope estimator–trend for cardinal temperatures of cactus pear.

Tabla 2.
Prueba de tendencia de Mann-Kendall y estimación de pendiente Sen para las temperaturas cardinales de nopal tunero.

Temperature °C	Mann-Kendall trend		Sen estimated slope	
	Z statistic	Significance	Slope	Constant
14 - 19 annual	-0.18	ns	-0.403	2092.469
< 13 annual	-0.68	ns	-2.460	2769.773
> 21 annual	2.43	*	10.589	2555.500
10 - 14 January	-1.25	ns	-0.323	167.492
< 10 January	-0.50	ns	-0.439	299.660
> 14 January	0.64	ns	0.655	315.058

Significance level: non-significant (ns), significant at $p \leq 0.1$ (*).

Nivel de significancia: no significativo (ns), significativo con $p \leq 0.1$ (*).

of January, independently of the value of the slope, resulted without significant tendency in the period from 1981 to 2010 (Table 2). These results indicated that the number of hours with average temperatures and temperatures below or above the optimal range in January appropriate for cactus pear, until now, have not been affected by climate change in the region producing cactus pear for the study period. This last analysis could be encouraging for cactus pear, however, the risk of a drop in temperature ≤ -5 °C is latent during the winter season, which, if it occurs, would minimally affect the yield and cosmetic quality of the fruit (Granata *et al.*, 2017).

Prospective analysis

For the analysis of future climate scenarios, the number of hours of each temperature range for the annual crop cycle and the month of January were related to their respective average maximum and minimum temperatures, this for 61 stations distributed nationwide. The generated models were significant ($p \leq 0.0001$) with values of determination coefficients (R^2) between 86.4 and 99.4 % (Table 3).

With the models outlined above, maps were generated of the number of hours of each of the ranges or threshold

horas con temperaturas medias y temperaturas por abajo o arriba del rango óptimo en el mes de enero apropiadas para el nopal tunero, hasta ahora, no han sido afectadas por el cambio climático en la región productora de nopal tunero para el periodo de estudio. Este último análisis podría ser alentador para el nopal tunero, sin embargo, el riesgo de un descenso de la temperatura ≤ -5 °C es latente durante la temporada de invierno, que, de ocurrir, mínimamente afectaría el rendimiento y calidad cosmética de la fruta (Granata *et al.*, 2017).

Análisis prospectivo

Para el análisis de escenarios climáticos futuros, el número de horas de cada rango de temperatura para el ciclo de cultivo anual y del mes de enero fueron relacionados con sus respectivas temperaturas máxima y mínima medias, esto para 61 estaciones distribuidas a nivel nacional. Los modelos generados fueron significativos ($p \leq 0.0001$) con valores de coeficientes de determinación (R^2) entre 86.4 y 99.4 % (Tabla 3).

Con los modelos arriba indicados, se generaron mapas del número de horas de cada uno de los rangos o temperaturas umbrales para el desarrollo del nopal tunero (Tabla 1) en el escenario climático actual (1981-2010) y para las climatologías 2030, 2050 y 2070, para los RCP 4.5 y 8.5.

Table 3.
Determination coefficients (R^2) and regression models to estimate the number of hours in each temperature range from average maximum and minimum temperature in the annual crop cycle and in the month of January.

Tabla 3.
Coefficientes de determinación (R^2) y modelos de regresión para estimar número de horas en cada rango de temperatura a partir de temperatura máxima y mínima media en el ciclo anual y en el mes de enero.

Range °C	R2	Max	Max ²	Min	Min ²	Constant
Annual mean temperature						
14 a 19	0.894		-2.038	281.710	-11.649	1919.211
< 13	0.968	-745.525	12.144	-317.890	4.208	16161.000
> 21	0.994	845.183	-10.908	-106.888	12.926	-11774.000
January mean temperature						
10 a 14	0.864	-28.017	0.452	20.027	-1.175	472.468
> 14	0.979	68.429	-1.134	12.182	0.533	-680.157
< 10	0.969	-39.779	0.663	-32.877	0.691	941.854

Max and Max² are, respectively, the linear and quadratic effect of the maximum temperature.

Min and Min² are, respectively, the linear and quadratic effect of the minimum temperature.

Max y Max² son, respectivamente, el efecto lineal y cuadrático de la temperatura máxima.

Min y Min² son, respectivamente, el efecto lineal y cuadrático de la temperatura mínima.

temperatures for the development of cactus pear (Table 1) in the current climate scenario (1981-2010) and for 2030, 2050 and 2070 climatologies, for RCP 4.5 and 8.5. As an example, the maps of temperature ranges 14 to 19 °C in the annual crop cycle and 10 to 14 °C average temperatures in the month of January are presented (Figures 3 and 4).

Optimal average annual temperature (14 to 19 °C)

Figure 3 shows the maps with the percentage of the number of hours with temperature in the optimal range for cactus pear development (14 to 19 °C) in the annual crop cycle in the north-central region. In reference to Figure 3A, it was observed that 100 % of the area planted with cactus pear in the producing municipalities (current scenario), is in the range of 20 to 30 % of the total number of hours in the year (Table 4). By the year 2030, a slight decrease in the cultivated area with percentage of hours from 20 to 30 % (orange color) would be expected, going from 100 to 99.6 % (Figure 3B and Table 4), which means that it would be practically the same area with temperature within the optimal range for cactus pear development. In the climate scenarios 2050 and 2070, it would also slightly decrease the surface area in the range 20-30 % of hours between 14 and 19 °C, but only 2.9 and 4.0 % in the 2050 and 2070 scenarios of RCP 4.5, respectively (Table 4). This indicates that the number of hours with optimal temperature for the development of this crop would only be slightly affected by the effect of climate change and would remain at least until 2070 in 96 % of the surface area of the producing municipalities. Considering RCP 8.5, the surface area in the range 20-30 % of hours with optimal temperature for cactus pear would have a decrease of up to 15.6 % in the 2070

Como ejemplo se presentan los mapas de rangos de temperatura 14 a 19 °C en el ciclo de cultivo anual y 10 a 14 °C de temperatura media en el mes de enero (Figuras 3 y 4).

Temperatura media anual óptima (14 a 19 °C)

En la Figura 3 se muestran los mapas con el porcentaje del número de horas con temperatura del rango óptimo para el desarrollo de nopal tunero (14 a 19 °C) en el ciclo de cultivo anual en la región centro norte. En referencia a la Figura 3A se observó que el 100 % de la superficie plantada con nopal tunero en los municipios productores (escenario actual), se encuentra en el rango de 20 a 30 % del número de horas totales en el año (Tabla 4). Para el año 2030 se esperaría una ligera disminución de la superficie cultivada con porcentaje de horas del 20 al 30 % (color naranja) al pasar del 100 al 99.6 % (Figura 3B y Tabla 4), esto significa que prácticamente sería la misma superficie con temperatura dentro del rango óptimo para el desarrollo de nopal. En los escenarios climáticos 2050 y 2070, también disminuiría ligeramente la superficie del rango 20 – 30 % de horas entre 14 y 19 °C, pero sólo 2.9 y 4.0 % en los escenarios 2050 y 2070 del RCP 4.5, respectivamente (Tabla 4). Lo anterior indica que el número de horas con temperatura óptima para el desarrollo de este cultivo sólo sería ligeramente afectado por efecto del cambio climático y se mantendría al menos hasta el año 2070 en 96 % de la superficie de los municipios productores. Considerando el RCP 8.5, la superficie del rango 20 – 30 % de horas con temperatura óptima para nopal tunero tendría una disminución hasta del 15.6 % en el escenario 2070. Considerando la presión ejercida sobre los recursos (e.g., agua, suelo, etc.) debido al incremento de la población y al cambio climático, la seguridad alimentaria no estaría

Table 4.
Surface percentage of the cactus pear fruit-producing municipalities in the north-central region in two ranges of percentage of hours with average annual temperature from 14 to 19 °C (optimum temperature for the development of cactus pear) in the current climate scenario and future scenarios.

Tabla 4.
Porcentaje de la superficie de los municipios productores de tuna en la región Centro-Norte en dos rangos de porcentaje de horas con temperatura media anual de 14 a 19 °C (temperatura óptima para el desarrollo de nopal tunero) en el escenario climático actual y en escenarios futuros.

Range of hours (%)	Percentage of the surface of producing municipalities						
	Current scenario	RCP 4.5			RCP 8.5		
		2030	2050	2070	2030	2050	2070
10 -20	0.0	0.4	2.9	4.0	0.6	4.3	15.4
20 - 30	100.0	99.6	97.1	96.0	99.4	95.7	84.6

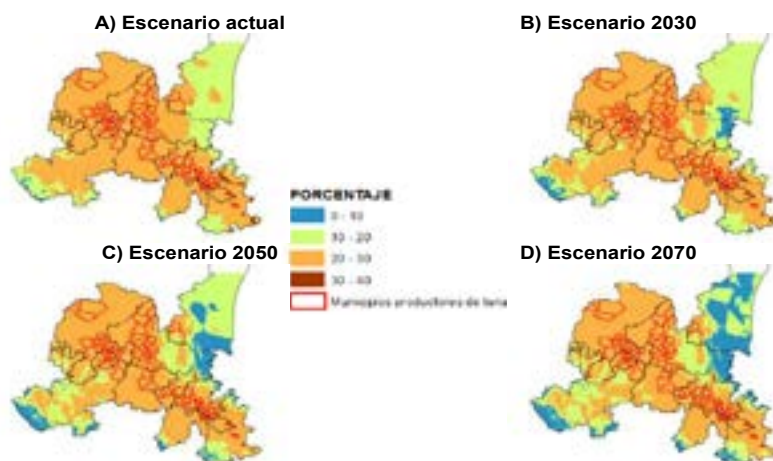


Figure 3. Percentage of the number of hours with temperature from 14 to 19 °C (optimum temperature for the development of cactus pear) in the annual cultivation cycle, in the current scenario (A) and three future climate scenarios of RCP 4.5 (B, C and D) for the cactus pear producing region in Mexico.

Figura 3. Porcentaje del número de horas con temperatura de 14 a 19 °C (temperatura óptima para el desarrollo de nopal tunero) en el ciclo de cultivo anual, en el escenario actual (A) y en tres escenarios climáticos futuros del RCP 4.5 (B, C y D) para la región productora de nopal tunero en México.

scenario. Considering the pressure on resources (e.g., water, soil, etc.) due to population increase and climate change, food security would not be guaranteed by that time (Rosenzweig *et al.*, 1994). However, the above scenarios, based only on temperature, offer the possibility to continue growing this species in the present and immediate future. The latter would be adverse for other crops (e.g., wheat, maize and barley) (Lobell & Field, 2007).

Lower marginal average annual temperature (< 13 °C)

Table 5 shows four ranges with the percentage of the number of hours with lower marginal temperature for the development of cactus pear (< 13 °C) in the annual crop cycle in the north-central region of Mexico. In the current scenario, 89.7 % of the surface in the municipalities that produce cactus pears has between 20-30 and 30-40 % of the total number of hours in the year < 13 °C. By the year 2030 with an RCP 4.5, the surface with percentage of 20 to 30 % would have an increase from 31.5 to 67.6 %, this surface would continue to increase in the climate scenarios 2050 and 2070. In contrast, the surface between 30 and 40 % of hours with temperature < 13 °C would decrease from 58.2 to 6.1 % in 2070 with an RCP 4.5. The latter scenario would be more negative by

garantizada para entonces (Rosenzweig *et al.*, 1994). No obstante, los escenarios arriba indicados, basados únicamente, en la temperatura, ofrecen la posibilidad para continuar cultivando esta especie en el presente y futuro inmediato. Esto último, resultaría adverso para otros cultivos (e.g., trigo, maíz y cebada) (Lobell & Field, 2007).

Temperatura media anual marginal inferior (< 13 °C)

En la Tabla 5 se indican cuatro rangos con el porcentaje del número de horas con temperatura marginal inferior para el desarrollo de nopal tunero (< 13 °C) en el ciclo de cultivo anual en la región centro norte de México. En el escenario actual, el 89.7 % de la superficie en los municipios productores de nopal tunero tiene entre 20 - 30 y 30 - 40 % del número de horas totales en el año < 13 °C. Para el año 2030 con un RCP 4.5, la superficie con porcentaje del 20 al 30 % tendría un aumento al pasar de 31.5 a 67.6 %, esta superficie continuaría incrementándose en los escenarios climáticos 2050 y 2070. En contraste, la superficie entre 30 y 40 % de horas con temperatura < 13 °C disminuiría de 58.2 a 6.1 % en el 2070 con un RCP 4.5. Este último escenario sería más negativo hacia 2070 con un RCP 8.5; es decir, habría menos horas con temperatura por debajo de 13 °C (Tabla 5).

Table 5.
Surface percentage of the cactus pear fruit-producing municipalities in the north-central region in four ranges of percentage of hours with annual average temperature lower than 13 °C (marginal temperature for the development of cactus pear) in the current climate scenario and future scenarios.

Tabla 5.
Porcentaje de la superficie de los municipios productores de tuna en la región Centro-Norte en cuatro rangos de porcentaje de horas con temperatura media anual menor de 13 °C (temperatura marginal para el desarrollo de nopal tunero) en el escenario climático actual y en escenarios futuros.

Range of hours (%)	Percentage of the surface of producing municipalities						
	Current scenario	RCP 4.5			RCP 8.5		
		2030	2050	2070	2030	2050	2070
0 - 20	3.1	6.3	12.9	19.6	7.3	23.4	68.1
20 - 30	31.5	67.6	78.0	73.9	72.9	70.8	29.9
30 - 40	58.2	23.1	8.2	6.1	17.6	5.5	2.0
40 - 60	7.3	3.0	0.8	0.4	2.3	0.3	0.0

2070 with an RCP 8.5; that is, there would be fewer hours with temperature below 13 °C (Table 5).

The decrease in the number of hours in the range of 30 to 40 % with mean annual temperature < 13 °C, could be beneficial for the cultivation of cactus pear, since daily temperatures < 15 °C delay fruit grown and maturation, but adversely, this would cause fruit with a higher proportion of peel than pulp, lower content of soluble solids and deficient pigmentation of the peel (Inglese *et al.*, 1995; Liguori *et al.*, 2006) cited by Inglese *et al.* (2017).

Average annual marginal higher temperature (> 21 °C)

88.3 % of the municipalities surface that produce cactus pear (current scenario) is in the ranges of 20-30 and 30-40 % of the total number of hours with higher marginal temperature (> 21 °C) for the annual development of cactus pear in the north-central region (Table 6). The 2030 year with an RCP 4.5 projection would consider a decrease of the surface with a percentage of 20-30 % going from 38.5 to 14.2 %, this tendency would be maintained in the climate scenarios 2050 and 2070. Similarly, the surface area in the range of 30 to 40 % of hours above 21 °C would decrease from 49.8 to 27.1 % in 2070 with an RCP 4.5; while the range of 40 to 50 % would increase, it means, there would be more hours with an annual average temperature above 21 °C. A similar prognosis would occur with an RCP 8.5, that is, the surface of the 40 to 50 % range of hours with marginal higher temperature for cactus pear would increase to 59.7 % in the 2070 scenario. The above indicates that the superior marginal temperature for the development of

La disminución del número de horas en el rango de 30 a 40 % con temperatura media anual < 13 °C, podría ser benéfica para el cultivo de nopal tunero, ya que temperaturas diarias < 15 °C retrasan el crecimiento y madurez del fruto, pero adversamente, esto provocaría fruta con mayor proporción de cáscara que pulpa, menor contenido de sólidos solubles y deficiente pigmentación de la cáscara (Inglese *et al.*, 1995; Liguori *et al.*, 2006) citados por Inglese *et al.* (2017).

Temperatura media anual marginal superior (> 21 °C)

El 88.3 % de la superficie de los municipios productores de nopal tunero (escenario actual) se encuentra en los rangos 20 – 30 y 30 – 40 % del número de horas totales con temperatura marginal superior (> 21 °C) para el desarrollo anual de nopal tunero en la región centro norte (Tabla 6). La proyección para el año 2030 con un RCP 4.5 consideraría una disminución de la superficie con porcentaje del 20 al 30 % al pasar del 38.5 a 14.2 %, esta tendencia se mantendría en los escenarios climáticos 2050 y 2070. De igual manera la superficie del rango entre 30 y 40 % de horas mayores a 21 °C disminuiría de 49.8 a 27.1 % en el 2070 con el RCP 4.5; mientras que el rango de 40 a 50 % aumentaría, es decir, habría más horas con temperatura media anual mayor de 21 °C. Un pronóstico similar se presentaría con el RCP 8.5, es decir, la superficie del rango de 40 al 50 % de horas con temperatura superior marginal para nopal tunero aumentaría hasta 59.7 % en el escenario 2070. Lo anterior indica que la temperatura marginal superior para el desarrollo de este cultivo se presentaría en mayor proporción por efecto del cambio climático, lo cual sería negativo para el cultivo de nopal tunero, ya que, aunque es una especie que puede

Table 6.
Surface percentage of cactus pear fruit-producing municipalities in the north-central region in five ranges of percentage of hours with an average annual temperature higher than 21 °C (higher marginal temperature for the development of cactus pear) in the current climate scenario and in future scenarios.

Tabla 6.
Porcentaje de la superficie de los municipios productores de tuna en la región Centro-Norte en cinco rangos de porcentaje de horas con temperatura media anual mayor a 21 °C (temperatura marginal superior para el desarrollo de nopal tunero) en el escenario climático actual y en escenarios futuros.

Range of hours (%)	Percentage of the surface of producing municipalities						
	Current scenario	RCP 4.5			RCP 8.5		
		2030	2050	2070	2030	2050	2070
0 - 20	5.9	2.0	0.6	0.3	1.6	0.2	0.0
20 - 30	38.5	14.2	5.4	3.9	11.0	3.6	1.1
30 - 40	49.8	68.1	42.2	27.1	65.0	23.9	7.4
40 - 50	5.4	13.2	46.0	61.5	19.0	64.3	59.7
50 - 70	0.4	2.5	5.7	7.2	3.4	8.0	31.8

this crop would be presented in greater proportion by the effect of climate change, which would be negative for the cultivation of cactus pear, since, although it is a species that can support high temperatures, when these are > 25 °C they reduce the net CO₂ assimilation in approximately 28 % (Nobel & Hartssock, 1984). When temperatures above 30 °C occur during the initial phase of fruit growth, the third phase of growth can be shortened, when the greatest cell elongation occurs in the edible portion, leading to early ripening and reduction in fruit size, firmness and sugar content (Inglese *et al.*, 2009). Besides, high temperatures during fruit growth reduce postharvest storage and shelf-life of cactus pear fruits, as this fruit is often more sensitive to low temperatures (< 8 °C) during storage (Inglese *et al.*, 2002). Therefore, instead of the increase in atmospheric CO₂ (Nobel, 1991), the increase in the upper marginal temperature estimated in this work would suggest, in the future, a greater limitation for the cultivation of this species (Nobel & Hartssock, 1984).

Optimum average temperature for the month of January (10 to 14 °C)

Figure 4 shows the maps with the percentage of the number of hours with an average temperature of January optimal for the development of cactus pear (10 to 14 °C) in the north-central region. In the current scenario (Figure 4A), it was observed that 82.8 % of the surface area of the producing municipalities, accumulated between 20 and 30 % of the total number of hours in January (Table 7). By 2030, a slight increase in the area with a percentage of hours of 20 to 30

soportar altas temperaturas, cuando éstas son > 25 °C reducen la asimilación neta de CO₂ en aproximadamente 28 % (Nobel & Hartssock, 1984). Cuando ocurren temperaturas mayores a 30 °C durante la fase inicial del crecimiento del fruto, se puede acortar la tercera fase del crecimiento, cuando tiene lugar la mayor elongación celular en la porción comestible, conduciendo a una maduración anticipada y reducción en el tamaño del fruto, firmeza y el contenido de azúcares (Inglese *et al.*, 2009). También, temperaturas altas durante el crecimiento del fruto, reducen el almacenamiento postcosecha y vida de anaquel de la tuna, ya que esta fruta suele ser más sensible a bajas temperaturas (< 8 °C) durante el almacenamiento (Inglese *et al.*, 2002). Por lo tanto, en lugar del aumento del CO₂ atmosférico (Nobel, 1991), el incremento de la temperatura marginal superior estimada en este trabajo, sugeriría, en el futuro, una mayor limitante para el cultivo de esta especie (Nobel & Hartssock, 1984).

Temperatura media óptima del mes de enero (10 a 14 °C)

En la Figura 4 se presentan los mapas con el porcentaje del número de horas con temperatura media del mes de enero óptima para el desarrollo de nopal tunero (10 a 14 °C) en la región centro norte. En el escenario actual (Figura 4A), se observó que el 82.8 % de la superficie de los municipios productores, acumula entre 20 y 30 % del número de horas totales en el mes de enero (Tabla 7). Para el año 2030 se esperaría un ligero incremento de la superficie con porcentaje de horas del 20 al 30 % (color verde) al pasar de 82.8 a 85.9 % (Figura 4B y Tabla 7). Esto último significa que,

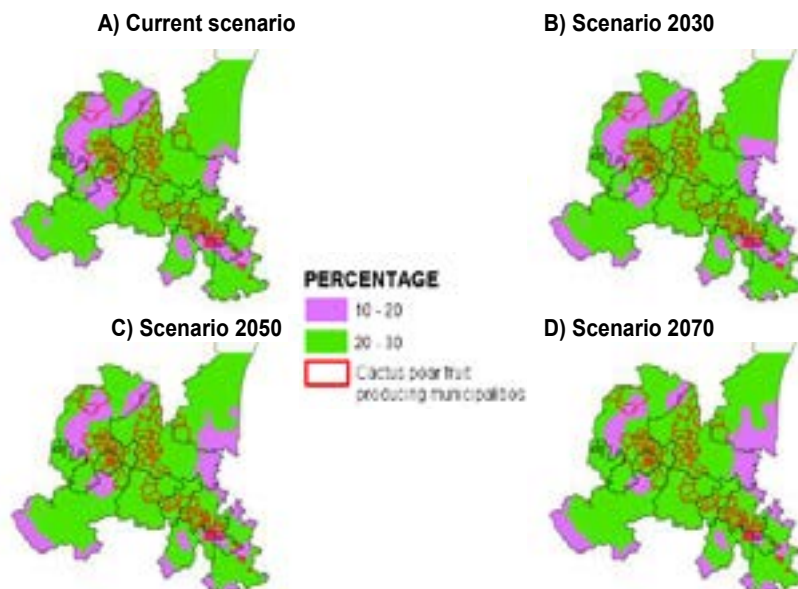


Figure 4. Percentage of the number of hours with a temperature of 10 - 14 °C in January (optimal temperature in January for the development of cactus pear), in the current scenario (A) and in three future climate scenarios of RCP 4.5 (B, C and D) in the cactus pear producing region in Mexico.

Figura 4. Porcentaje del número de horas con temperatura de 10 - 14 °C en el mes de enero (temperatura óptima en el mes de enero para el desarrollo de nopal tunero), en el escenario actual (A) y en tres escenarios climáticos futuros del RCP 4.5 (B, C y D) en la región productora de nopal tunero en México.

Table 7.

Surface percentage of the cactus pear fruit-producing municipalities in the north-central region in two ranges of percentage of hours with an average temperature of 10 to 14 °C in January (optimal temperature for the development of cactus pear) in the current climate scenario and in future scenarios.

Tabla 7.

Porcentaje de la superficie de los municipios productores de tuna en la región Centro-Norte en dos rangos de porcentaje de horas con temperatura media de 10 a 14 °C en el mes de enero (temperatura óptima para el desarrollo de nopal tunero) en el escenario climático actual y en escenarios futuros.

Range of hours (%)	Percentage of the surface of producing municipalities						
	Current scenario	RCP 4.5			RCP 8.5		
		2030	2050	2070	2030	2050	2070
10 -20	17.2	14.1	10.9	7.3	10.9	6.7	4.0
20 - 30	82.8	85.9	89.1	92.7	89.1	93.3	96.0

% (green color) would be expected, going from 82.8 to 85.9 % (Figure 4B and Table 7). The latter means that it would be practically the same surface with temperature within the optimal range in the month of January for the development of cactus pear. In the climate scenarios 2050 and 2070, the surface would continue to increase slightly in the range of

prácticamente sería la misma superficie con temperatura dentro del rango óptimo en el mes de enero para el desarrollo de nopal. En los escenarios climáticos 2050 y 2070, la superficie continuaría aumentando ligeramente en el rango de 20 – 30 % de horas entre 10 y 14 °C en el mes de enero hasta llegar a 89.1 y 92.7 % en el RCP 4.5. Lo

20-30 % of hours between 10 and 14 °C in January until reaching 89.1 and 92.7 % in RCP 4.5. This indicates that the optimal temperature in January for the development of this crop would be positive and slightly modified as a result of climate change at least until 2070. Considering the RCP 8.5, the surface with a percentage of 20 to 30 % of hours with optimal temperature in January for the development of this crop would have a similar behavior until reaching 96.0 % of the surface by 2070. This last result, suggests to support the theory that global warming would favor the expansion of the surface cultivated with *O. ficus-indica* (Nobel & Bobich, 2002; García-Moya *et al.*, 2012; Lobell & Gourdji, 2012) because this species is more susceptible to low than high temperatures (Nobel, 1996; Nobel & Bobich, 2002); but in addition, anatomically and physiologically it would adapt better to scenarios with high concentrations of atmospheric CO₂ (Nobel, 1991) where other plant species of agronomic interest would not prosper (Lobell and Field, 2007). However, research on the reproductive biology and physiology of this species should be considered (Nobel, 2002; Pimienta-Barrios & del Castillo, 2002) under possible climate change scenarios (Inglese *et al.*, 2017).

Average temperature of the month of January sub-optimal lower (< 10 °C)

Table 8 shows five ranges with the percentage of the number of hours with an average temperature of January sub-optimum lower for the development of cactus pear (< 10 °C) in the north-central region. In the current scenario,

anterior indica que la temperatura óptima del mes de enero para el desarrollo de este cultivo sería positiva y ligeramente modificada como resultado del cambio climático al menos hasta el año 2070. Considerando el RCP 8.5 la superficie con porcentaje del 20 al 30 % de horas con temperatura óptima en el mes de enero para para el desarrollo de este cultivo tendría un comportamiento similar hasta alcanzar 96.0 % de la superficie para 2070. Este último resultado, sugiere apoyar la teoría de que el calentamiento global favorecería la expansión de la superficie cultivada con *O. ficus-indica* (Nobel & Bobich, 2002; García-Moya *et al.*, 2012; Lobell & Gourdji, 2012) porque esta especie es más susceptible a bajas que a altas temperaturas (Nobel, 1996; Nobel & Bobich, 2002); pero además, anatómica y fisiológicamente se adaptaría mejor a escenarios con altas concentraciones de CO₂ atmosférico (Nobel, 1991) donde otras especies vegetales de interés agronómico, no prosperarían (Lobell y Field, 2007). Sin embargo, habría que considerar investigar la biología y fisiología reproductiva de esta especie (Nobel, 2002; Pimienta-Barrios & del Castillo, 2002) bajo los posibles escenarios de cambio climático (Inglese *et al.*, 2017).

Temperatura media del mes de enero sub óptima inferior (< 10 °C)

En la Tabla 8 se presentan cinco rangos con el porcentaje del número de horas con temperatura media del mes de enero sub óptima inferior para el desarrollo de nopal tunero (<10 °C) en la región centro norte. En el escenario actual, 85.0 % de la superficie de los municipios

Table 8.
Percentage of the surface of the cactus pear fruit-producing municipalities in the north-central region in five ranges of percentage of hours with an average temperature lower than 10 °C in the month of January (lower suboptimal temperature for the development of cactus pear) in the current climate scenario and in future scenarios.

Tabla 8.
Porcentaje de la superficie de los municipios productores de tuna en la región Centro-Norte en cinco rangos de porcentaje de horas con temperatura media menor a 10 °C en el mes de enero (temperatura sub óptima inferior para el desarrollo de nopal tunero) en el escenario climático actual y en escenarios futuros.

Range of hours (%)	Percentage of the surface of producing municipalities						
	Current scenario	RCP 4.5			RCP 8.5		
		2030	2050	2070	2030	2050	2070
0 - 20	0.0	1.4	2.5	3.1	2.4	4.7	8.1
20 - 30	4.9	7.6	14.9	22.3	12.1	34.4	62.0
30 - 40	30.8	48.1	61.3	63.7	59.1	53.9	28.7
40 - 50	54.2	39.2	20.4	10.6	24.8	7.0	1.2
50 - 70	10.0	3.8	0.9	0.2	1.6	0.1	0.0

85.0 % of the surface of the producing municipalities has between 30 and 50 % of the total number of hours in the month of January. With reference to this last scenario, the forecast for the years 2030, 2050 and 2070 with an RCP 4.5 would indicate an increase of this area in 17.3, 30.5 and 32.9 %, respectively. In contrast, the area in the range 40 – 50 % would decrease by 15.0, 33.8 and 43.6 % for 2030, 2050 and 2070 years, respectively. Thus, the decrease of the surface in the range 40-50 % would contribute with more surface to the range 30-40 %. The above indicates that the lower sub-optimal temperature of January for the development of this crop would be positively influenced by the effect of climate change and would be maintained at least until 2070. Considering the RCP 8.5, the surface with a percentage of 40 to 50 % of hours with sub-optimal temperature in January for cactus pear would have the same behavior, but a greater decrease in this surface in the 2070 scenario. In other words, the lower sub-optimal temperature in January would decrease, which could promote the development of cactus pear by decreasing the risk of frost (Nobel, 1996). However, the moderate lack of winter cold could reduce the number of reproductive buds, which would result in loss of productivity (Nerd & Mizrahi, 1995). Temperature increases in producing regions of the world are a constant concern (Inglese *et al.*, 2017).

Average temperature of January sub-optimal higher (> 14 °C)

Table 9 shows five ranges of percentages of the number of hours with an average temperature of January sub-optimal superior (> 14 °C) for the development of this plant in the north-central region. In the current scenario, 84.3 % of the surface of the producing municipalities are located in the ranges 30-40 and 40-50 % with the number of hours with an average temperature of the month of January sub-optimal superior (> 14 °C). By 2030, with an RCP 4.5, the surface area will decrease from 30 to 40 %, from 25.4 to 7.7 %. This trend would continue steadily in the 2050 and 2070 climate scenarios and would be dramatic for all three RCP 8.5 scenarios (Table 9). In contrast, the surface of the 40 to 50% for hour range above 14°C would increase from 58.9 to 61.7 % in 2030, and then decrease in the 2050 and 2070 scenarios with RCP 4.5. The range 50-60 % of hours, whose current scenario had 12.3 % of the surface of the cactus pear fruit-producing municipalities, would increase to 60.9 % in 2070 with an RCP 4.5 and this behavior would be similar with an RCP 8.5. This indicates that the sub-optimal upper temperature of January for the development of this crop would be influenced by

productores tiene entre 30 y 50 % del número de horas totales en el mes de enero. Con referencia en este último escenario, el pronóstico para los años 2030, 2050 y 2070 con un RCP 4.5 indicaría un aumento de esta superficie en 17.3, 30.5 y 32.9 %, respectivamente. En contraste, la superficie del rango 40 – 50 % disminuiría 15.0, 33.8 y 43.6 % para los años 2030, 2050 y 2070, respectivamente. Así, la disminución de la superficie del rango 40 – 50 % contribuiría con mayor superficie al rango 30 – 40 %. Lo anterior indica que la temperatura sub óptima inferior del mes de enero para el desarrollo de este cultivo estaría influenciada positivamente por efecto del cambio climático y se mantendría al menos hasta el año 2070. Considerando el RCP 8.5 la superficie con porcentaje del 40 al 50 % de horas con temperatura sub óptima en el mes de enero para nopal tunero tendría el mismo comportamiento, pero mayor decremento en esta superficie en el escenario 2070. En otras palabras, disminuiría la temperatura sub óptima inferior en el mes de enero, lo que pudiera favorecer al desarrollo del nopal tunero al disminuir el riesgo de heladas (Nobel, 1996). Sin embargo, la falta moderada de frío invernal, podría disminuir el número de yemas reproductivas, lo cual se traduciría en pérdida de la productividad (Nerd & Mizrahi, 1995). El incremento de la temperatura en regiones productoras del mundo es una constante preocupación (Inglese *et al.*, 2017).

Temperatura media del mes de enero sub óptima superior (> 14 °C)

En la Tabla 9 se presentan cinco rangos de porcentajes del número de horas con temperatura media del mes de enero sub óptima superior (> 14 °C) para el desarrollo de nopal tunero en la región centro norte. En escenario actual, 84.3 % de la superficie de los municipios productores se ubican en los rangos 30 - 40 y 40 – 50 % con el número de horas con temperatura media del mes de enero sub óptima superior (> 14 °C). Para el año 2030 del RCP 4.5 se tendría una disminución de la superficie del rango 30 a 40 % al pasar de 25.4 a 7.7 %. Esta tendencia continuaría sostenidamente en los escenarios climáticos 2050 y 2070 y sería dramática para los tres escenarios del RCP 8.5 (Tabla 9). En contraste, la superficie del rango entre 40 y 50 % de horas mayores de 14 °C aumentaría de 58.9 a 61.7 % en el 2030, para luego disminuir en los escenarios 2050 y 2070 con un RCP 4.5. El rango 50 – 60 % de horas, cuyo escenario actual contó con 12.3 % de la superficie de los municipios productores de tuna, se incrementaría hasta 60.9% en 2070 con un RCP 4.5 y este comportamiento sería similar con un RCP 8.5. Lo anterior indica que la

Table 9.

Surface percentage of the cactus pear fruit-producing municipalities in the north-central region in five ranges of percentage of hours with an average temperature higher than 14 °C in the month of January (higher sub optimal temperature for the development of cactus pear) in the current climate scenario and future scenarios.

Tabla 9.

Porcentaje de la superficie de los municipios productores de tuna en la región Centro-Norte en cinco rangos de porcentaje de horas con temperatura media mayor a 14 °C en el mes de enero (temperatura sub óptima superior para el desarrollo de nopal tunero) en el escenario climático actual y en escenarios futuros.

Range of hours (%)	Percentage of the surface of producing municipalities						
	Current scenario	RCP 4.5			RCP 8.5		
		2030	2050	2070	2030	2050	2070
10 - 30	1.0	0.2	0.1	0.0	0.1	0.0	0.0
30 - 40	25.4	7.7	1.8	0.7	3.2	0.3	0.0
40 - 50	58.9	61.7	43.8	27.5	51.0	14.2	2.4
50 - 60	12.3	26.5	46.7	60.9	39.7	65.3	50.0
60 - 80	2.3	3.9	7.5	10.8	6.0	20.2	47.7

the effect of climate change and would increase in the future. In other words, an increase in the January upper sub-optimal temperature could negatively affect crop productivity due to the absence of low temperatures during the winter (Nerd & Mizrahi, 1995).

Conclusion

In general, climate change would have little effect on the number of hours with average annual temperature in the optimal range for the development of cactus pear (14 to 19 °C) and on the number of hours with an average temperature in January in the optimal range (10 to 14 °C). In the first case, the surface of the municipalities with that optimum temperature would only decrease in 2070 by 4 % and 15.4 % with RCP 4.5 and RCP 8.5, respectively. In the second case, the surface area of the municipalities with that optimal temperature would increase by 9.9 % and 13.2 % in the 2070 year with RCP 4.5 and RCP 8.5, respectively.

The lower mean annual marginal temperature for the development of cactus pear (< 13 °C) and the upper mean annual marginal temperature for the development of cactus pear (> 21 °C), would be influenced by the climate change, since, in the municipalities producing cactus pear, the number of hours of the lower marginal temperature would decrease and the number of hours of the upper marginal temperature would increase in the climatology 2070 RCP 4.5.

temperatura sub óptima superior del mes de enero para el desarrollo de este cultivo se vería influenciada por efecto del cambio climático y se incrementaría en el futuro. En otras palabras, el aumento de la temperatura sub óptima superior en el mes de enero, podría afectar negativamente la productividad del cultivo debido a ausencia de bajas temperaturas durante el invierno (Nerd & Mizrahi, 1995).

Conclusión

En general el cambio climático tendría poco efecto en el número de horas con temperatura media anual en el rango óptimo para el desarrollo de nopal tunero (14 a 19 °C) y en el número de horas con temperatura media en el mes de enero en el rango óptimo (10 a 14 °C). En el primer caso, la superficie de los municipios con esa temperatura óptima únicamente disminuiría en el año 2070 4 % y 15.4 % con los RCP 4.5 y RCP 8.5, respectivamente. En el segundo caso, la superficie de los municipios con esa temperatura óptima aumentaría 9.9 % y 13.2 % en el año 2070 en los RCP 4.5 y RCP 8.5, respectivamente.

La temperatura media anual marginal inferior para el desarrollo del nopal tunero (< 13 °C) y la temperatura media anual marginal superior para el desarrollo del nopal tunero (> 21 °C), serían influenciadas por el cambio climático, ya que, en los municipios productores de tuna disminuiría el número de horas de la temperatura marginal inferior y aumentaría el número de horas de la temperatura marginal superior en la climatología 2070 RCP 4.5.

The average temperature of January sub-optimal inferior for the development of the cactus pear (< 10 °C) and the average temperature of January sub-optimal superior for the development of the cactus pear (> 14 °C), would be influenced by the climatic change, since, in the municipalities producers of cactus pear would diminish the number of hours of the sub-optimal inferior temperature and would increase the number of hours of the sub-optimal superior temperature in the climatology 2070 RCP 4.5.

La temperatura media del mes de enero sub óptima inferior para el desarrollo del nopal tunero (< 10 °C) y la temperatura media del mes de enero sub óptima superior para el desarrollo del nopal tunero (> 14 °C), serían influenciadas por el cambio climático, ya que, en los municipios productores de tuna disminuiría el número de horas de la temperatura sub óptima inferior y aumentaría el número de horas de la temperatura sub óptima superior en la climatología 2070 RCP 4.5.

Acknowledgments

This research was financed by the National Institute of Forestry, Agricultural and Livestock Research (INIFAP-México) through project No: 8403134459.

Agradecimientos

Esta investigación fue financiada por el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP-México) al través del proyecto No. de Ref: 8403134459.

References

- Ahmed, S. I., Rudra, R., Dickinson, T. & Ahmed, M. (2014). Trend and periodicity of temperature time series in Ontario. *American Journal of Climate Change*, 3: 272-288. <http://dx.doi.org/10.4236/ajcc.2014.33026>
- Cushman, J. C. & Bohnert, H. J. (1999). Crassulacean acid metabolism: molecular genetics. *Annual Review of Plant Physiology and plant Molecular Biology*, 50: 305-332. <https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.50.1.305>
- Fritz, J. O., Vanderlip, R. L., Heiniger, R. W. & Abelhalim, A. Z. (1997). Simulating forage sorghum yields with SORKAM. *Agronomy Journal*, 89: 64-68. <https://doi.org/10.2134/agronj1997.00021962008900010010x>
- García-Moya, E., Romero Manzanares, A. & Nobel, P.S. (2010). Highlights for agave productivity. *GCB Bioenergy*, 3:4–14. <https://doi.org/10.1111/j.1757-1707.2010.01078.x>
- Granata, G., Faedda, R. & Ochoa, M. J. (2017). Diseases of cactus pear. In: *Crop Ecology, Cultivation and Uses of Cactus Pear*. Inglese, P., Mondragon, C., Nefzaoui, A. and Sáenz, C., eds. 115-123 pp. The Food and Agriculture Organization of the United Nations and the International Center for Agricultural Research Dry Areas. Roma, Italy. <http://www.fao.org/3/a-i7012e.pdf>
- Inglese, P. (1995). Orchard planting and management. In: *Agro-ecology, Cultivation and Uses of Cactus Pear*. Barbera, G., Inglese, P., and Pimienta Barrios, E., eds. 78-71 pp. The Food and Agriculture Organization of the United Nations and the International Center for Agricultural Research Dry Areas. Roma, Italy.
- Inglese, P., Basile, F. & Schirra, M. (2002). Cactus pear fruit production. In: *Cacti as a crop* (P. S. Nobel Ed.). California University Press, 163-183.
- Inglese, P., Gugliuzza, G. & Liguori, G. (2009). Fruit production of cultivated cacti: a short overview on plant ecophysiology and C Budget *Acta Horticulturae*, 811: 77-86. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2009.811.6>
- Inglese, P., Liguori, G. & de la Barrera, E. (2017). Ecophysiology and reproductive biology of cultivated cacti. In: *Crop Ecology, Cultivation and Uses of Cactus Pear*. Inglese, P., Mondragon, C., Nefzaoui, A. & Sáenz, C., eds. 29-41 pp. The Food and Agriculture Organization of the United Nations and the International Center for Agricultural Research in the Dry Areas, Rome, Italy. <http://www.fao.org/3/a-i7012e.pdf>
- 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.K. Pachauri and L.A. Meyer (Eds.)]. Geneva, Switzerland, 151 pp. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/05/SYR_AR5_FINAL_full_wcover.pdf
- Kendall, M. G. (1975). *Rank Correlation Methods*. 4th Edition, Charles Griffin, London. <https://www.worldcat.org/title/rank-correlation-methods/oclc/3827024>

- Kumar, K., Singh, D. & Singh R. S. (2018). Cactus pear: Cultivation and Uses. CIAH/Tech./Pub. No73, pp 38 ICA R-Central Institute for Arid Horticulture, Bikaner, Rajasthan, India. https://www.researchgate.net/publication/330104598_Cactus_Pear_Cultivation_and_uses
- Liguori, G., Di Miceli, C., Gugliuzza, G. & Inglese, P. (2006). Physiological and technical aspects of cactus pear (*Opuntia ficus-indica* (L.) Mill.) double reflowering and out-of-season winter fruit cropping. *Intranational Journal Fruit Science*, 6(3): 23-34. https://doi.org/10.1300/J492v06n03_03
- Lobell, D. B. & Field, C. B. (2007). Global scale climate–crop yield relationships and the impacts of recent warming. *Environmental Research Letters*, 2:1-7. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/2/1/014002/meta>
- Lobell, D. B. & Gourdji, M.S. (2012). The influence of climate change on global crop productivity. *Plant Physiology*, 160: 1686–1697. <https://doi.org/10.1104/pp.112.208298>
- Mann, H. B. (1945). Non-parametric test against trend. *Econometrika*, 13: 245-259. <http://dx.doi.org/10.2307/1907187>
- Medina-García, G., Ruiz-Corral, J. A., Rodríguez-Moreno, V. M., Soria-Ruiz, J., Díaz-Padilla, G. & Zarazúa-Villaseñor, P. (2016). Efecto del cambio climático en el potencial productivo del frijol en México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 13: 2465-2474. <https://doi.org/10.29312/remexca.v0i13.461>
- Medina-García, G., Grageda-Grageda, J, Ruiz-Corral, J, Casas-Flores, J, Rodríguez-Moreno, V. & de la Mora-Orozco, C. (2019a). Disminución de las horas frío como efecto del cambio climático en México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 10: 1325-37. <https://doi.org/10.29312/remexca.v10i6.1688>
- Medina-García, G., Zegbe, J. A. & Casas, J. I. (2019b). Efecto del calentamiento global en el rango térmico de nopal tunero (*Opuntia* spp) en el Centro Norte de México. *Memorias de la Semana Internacional de Agronomía FAZ-UJED*. pp. 686-691. <http://faz.ujed.mx/siafaz/memorias/201931.pdf>
- Melo, T. M., Louzada, J. A. S. & Pedrollo, O. C. (2015). Trends in extreme indices and seasonal analysis of precipitation and temperature in the Northwest Region of Rio Grande do Sul, Brazil. *American Journal of Climate Change*, 4: 187-202. <http://dx.doi.org/10.4236/ajcc.2015.43015>
- Miró, J., Estrela, M. J., Pastor, F. & Millán, M. (2009). Análisis comparativo de tendencias en la precipitación, por distintos inputs, entre los dominios hidrológicos del Segura y del Júcar. *Investigaciones Geográficas*, 49: 129-157. <https://dx.doi.org/10.14198/INGEO2009.49.07>
- Nerd, A. & Mizrahi, Y. (1995). Effect of low winter temperatures on bud break in *Opuntia ficus-indica*. *Advances in Horticultural Science*, 9: 1–4. <https://www.jstor.org/stable/42883043?seq=1>
- Nobel, P. S. & Hartsock, T. L. (1984). Physiological responses of *Opuntia ficus-indica* to growth temperature. *Physiologia Plantarum*, 60(1): 98-105. <https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.1984.tb04257.x>
- Nobel, P. S. (1988). *Environmental biology of agaves and cacti*. Cambridge, NY, USA, Cambridge University Press. 270 pp.
- Nobel, P. S. (1991). Environmental productivity indices and productivity for *Opuntia ficus-indica* under current and elevated atmospheric CO₂ levels. *Plant, Cell and Environment*, 14: 637-646. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.1991.tb01536.x>
- Nobel, P. S. (1996). Responses of some North American CAM plants to freezing temperatures and doubled CO₂ concentrations: Implications of global climate change for extending cultivation. *Journal of Arid Environments*, 34: 187–196. <https://doi.org/10.1006/jare.1996.0100>
- Nobel, P. S. & Bobich, E. G. (2002). *Environmental biology*. In: *Cacti: Biology and uses*. Nobel, P. S., ed. 57-74 pp. Berkeley, CA, USA, University of California Press.
- Nobel, P. S. (2002). Cactus physiological ecology, emphasizing gas exchange of *Platyopuntia* fruit. *Acta Horticulturae*, 581: 143-150. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2002.581.12>
- Pimienta-Barrios, E. (1990). El nopal tunero. México, Universidad de Guadalajara.
- Pimienta-Barrios, E. & del Castillo, R. F. (2002). *Environmental biology*. In: *Cacti: Biology and uses*. Nobel, P. S., ed. 75-90 pp. Berkeley, CA, USA, University of California Press.
- Potgieter, J. & D'Aquino, S. (2017). Fruit production and post-harvest management. In: *Crop Ecology, Cultivation and Uses of Cactus Pear*. Inglese, P., Mondragon, C., Nefzaoui, A. & Sáenz, C., eds. 51-71 pp. The Food and Agriculture Organization of the United Nations and the International Center for Agricultural Research in the Dry Areas, Rome, Italy. <http://www.fao.org/3/a-i7012e.pdf>

- Prat, L. & Franck, N. (2017). Morphology and anatomy of *Platyopuntiae*. In: Crop Ecology, Cultivation and Uses of Cactus Pear. Inglese, P., Mondragon, C., Nefzaoui, A. & Sáenz, C., eds. 21-28 pp. The Food and Agriculture Organization of the United Nations and the International Center for Agricultural Research Dry Areas. Roma, Italy. <http://www.fao.org/3/a-i7012e.pdf>
- Rosenzweig, C. & Parry, M. L. (1994). Potential impact of climate-change on world food-supply. *Nature*, 367. 133–8. https://pubs.giss.nasa.gov/docs/1994/1994_Rosenzweig_ro05500b.pdf
- Ruiz, J. A., Medina, G., Ramírez, J. L., Flores, H. E., Ramírez, G., Manríquez, J. D., Zarazúa, P., González, D. R., Díaz, G. & Mora, C. (2011). Cambio climático y sus implicaciones en cinco zonas productoras de maíz en México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 2: 309-323. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-09342011000800011
- Ruiz, J. A., Medina, G., González, I. J., Flores, H. E., Ramírez, G., Ortiz, C., Byerly, K. F. & Martínez, R. A. (2013). Requerimientos agroecológicos de cultivos. 2a. Edición. Centro de Investigación Regional Pacífico Centro. Campo Experimental Centro Altos de Jalisco. Tepatlán, Jalisco, México. Libro Técnico Núm. 3. 564 p.
- Ruiz-Corral, J. A.; Medina-García, G.; Rodríguez-Moreno, V. M.; Sánchez-González, J. J.; Villavicencio, G. R.; Durán, P. N.; Grageda, G. J. & García, J. E. (2016). Regionalización del cambio climático en México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 13: 2451-2464. <https://doi.org/10.29312/remexca.v0i13.460>
- Salmi, T., Maatta, A., Anttila, P., Ruoho-Airola, T. & Amnell, T. (2002). Detecting trends of annual values of atmospheric pollutants by the Mann-Kendall test and Sen's slope estimates –the Excel template application MAKESENS. Finnish Meteorological Institute, Air Quality Research. Publications on Air Quality No. 31. Report code FMI-AQ-31. https://www.researchgate.net/publication/259356944_Detecting_Trends_of_Annual_Values_of_Atmospheric_Pollutants_by_the_Mann-Kendall_Test_and_Sen's_Solpe_Estimates_the_Excel_Template_Application_MAKESENS
- Sen, P. K. (1968). Estimates of the regression coefficient based on Kendall's Tau. *Journal of the American Statistical Association*, 63 (324): 1379-1389. <https://www.pacificclimate.org/~werner/zyp/Sen%201968%20JASA.pdf>
- SIAP [Servicio de Información y Estadística Agroalimentaria y Pesquera]. (2020). Anuario estadístico de la producción agrícola 2003-2016. SAGARPA. http://infosiap.siap.gob.mx/aagricola_siap_gb/ cultivo/index.jsp
- Snyder, R. L. (1985). Hand calculating degree-days. *Agricultural and Forest Meteorology*, 35: 353-358. [https://doi.org/10.1016/0168-1923\(85\)90095-4](https://doi.org/10.1016/0168-1923(85)90095-4)
- Van Vuuren, 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: 5-31 <http://link.springer.com/article/10.1007%25252Fs10584-011-0148-z>
- Varela-Gómez, Y., Caldera-Arellano, A. K., Zegbe, J. A., Serna-Pérez, A. & Mena-Covarrubias, J. (2014). El riego en nopal influye en el almacenamiento y acondicionamiento de la tuna. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 8: 1377-1390. <https://doi.org/10.29312/remexca.v5i8.817>
- Walton, D., Meyerson, J. & Neelin, J. D. (2013). Accessing, Downloading, and Viewing CMIP5 Data. Earth System Grid Federation.