

Impacto del cambio climático sobre la estación de crecimiento en el estado de Jalisco, México*

Impact of climate change on the growing season in the state of Jalisco, Mexico

José Ariel Ruiz-Corral^{1§}, Guillermo Medina-García², Hugo Ernesto Flores López¹, José Luis Ramírez Díaz¹, Lino De la Cruz Larios³, José Francisco Villalpando Ibarra⁴, Celia De La Mora Orozco¹, Noé Durán Puga³, Giovanni Emmanuel García Romero¹ y Osías Ruiz Álvarez⁵

¹Campo Experimental Centro-Altos de Jalisco-INIFAP. Carretera libre Tepatitlán-Lagos de Moreno, km 8. Tepatitlán, Jalisco, México. ²Campo Experimental Zacatecas-INIFAP Carretera Zacatecas-Fresnillo, km 24.5. Calera, Zacatecas, México. ³Centro Universitario de Ciencias Biológicas y Agropecuarias. Universidad de Guadalajara. Carretera Guadalajara-Nogales, km 15.5, Jalisco, México. ⁴Ex-funcionario de la Organización Meteorológica Mundial, Ginebra, Suiza. ⁵Campo Experimental Pabellón-INIFAP. Carretera Aguascalientes-Zacatecas, km 32.5, Pabellón de Arteaga, Aguascalientes, México. [§]Autor de correspondencia: ruiz.ariel@inifap.gob.mx.

Resumen

El objetivo de la presente investigación fue evaluar el impacto que tendrá el cambio climático del presente siglo sobre la estación de crecimiento (EC) en el estado de Jalisco, México. Para ello se determinó la EC en 134 estaciones meteorológicas del estado con valores probabilísticos de lluvia y el valor promedio de la ETP estimada con el método Penman-Monteith a través del programa ETo Calculator. Estas determinaciones se utilizaron para modelar los parámetros de la EC para los períodos 2041-2060 (año promedio 2050) Rcp 4.5, 2061-2080 (año promedio 2070) Rcp 4.5, y 1961-2010 (climatología de referencia). Como insumo de las climatologías 2050 y 2070 se utilizaron los valores promedio mensuales de precipitación y temperatura media derivados de la implementación de un modelo que incluye el ensamble de 11 modelos de circulación global (MCG). Los resultados mostraron que en el estado de Jalisco existen diferencias inter-regionales para la fecha de inicio, fecha de finalización y duración de la estación de crecimiento. Además el cambio climático provocará que la duración de la estación de crecimiento (DEC) se reduzca entre -1 y -21 días en 2050 y entre -1 y -35 días en 2070, con respecto a la DEC de la climatología de referencia.

Abstract

The objective of this study was to evaluate the impact that climate change will have this century over the growing season (EC) in the state of Jalisco, Mexico. To this end, EC was determined from 134 meteorological stations from the state with probability values of rainfall and the average value of ETP estimated with the Penman-Monteith method through ETo Calculator program. These measurements were used to model the parameters of EC for the periods 2041-2060 (average year 2050) Rcp 4.5, 2061-2080 (average year 2070) Rcp 4.5, and from 1961 to 2010 (reference climatology). As input for the 2050 and 2070 climatology, the average monthly precipitation and average temperature derived from the implementation of a model that includes the assembly of 11 global circulation models (GCMs) were used. The results showed that in the state of Jalisco there are inter-regional differences for the initial date, end date and duration of the growing season. Furthermore climate change will make reduce the duration of the growing season (DEC) between -1 and -21 days by 2050 and between -1 and -35 days by 2070, regarding DEC from reference climatology. This reduction in DEC is mainly due to climate change will cause a delay in the

* Recibido: noviembre de 2015
Aceptado: febrero de 2016

Esta reducción de la DEC será mayormente debida a que el cambio climático provocará un retraso en el inicio de las lluvias (inicio de estación de crecimiento, IEC) y en menor grado un adelanto en la finalización del período de lluvias (finalización de la estación de crecimiento, FEC). Estos escenarios desfavorables proyectados para la estación de crecimiento en Jalisco, señalan la necesidad de diseñar estrategias que permitan reducir el impacto del cambio climático sobre los sistemas de producción agrícola estatales.

Palabras clave: calentamiento global, estación de crecimiento, impactos del cambio climático.

Introducción

Dentro de los efectos que el cambio climático tiene y tendrá sobre el agroclima de las áreas agrícolas, se encuentra el que se refiere a la estación de crecimiento (EC), el cual se considera el parámetro agroclimático más importante y determinante para los cultivos en condiciones de temporal. De acuerdo con el mapa digital de uso de suelo serie V, elaborado por el INEGI para la República Mexicana (INEGI, 2013), el 69% de la superficie agrícola se cultiva bajo condiciones de temporal, mientras que en Jalisco este porcentaje es de 77.6%.

La EC se define como el período con condiciones climáticas adecuadas para el crecimiento y desarrollo de cultivos, aunque dentro de estas condiciones son fundamentales la precipitación, la temperatura y la radiación solar. Existen reportes que el cambio climático está alterando directamente las condiciones de temperatura e indirectamente las condiciones de precipitación y radiación solar de todas las regiones del planeta (IPCC, 2013) incluyendo México (Cavazos *et al.*, 2013) y el Estado de Jalisco en particular (Zarazúa *et al.*, 2011). Estos cambios termo-pluviométricos se han reflejado ya en los parámetros de la EC (Ruiz *et al.*, 2000).

Esta tendencia se prevé que continúe durante el S. XXI, con sus mayores impactos en zonas tropicales y subtropicales (Mora *et al.*, 2015) de latitudes bajas (< 30°) y medias (entre 30 y 60°). En el país y específicamente el estado de Jalisco se encuentran bajo estas condiciones geográficas. Considerando una ruta representativa de concentración de gases efecto invernadero (Rcp) 8.5, Mora *et al.* (2015) reportaron mediante modelación, que el número de días propicios para el crecimiento de plantas se reducirá

onset of rains (beginning of growing season, IEC) and to a lesser extent the rainy season will emend earlier (completion of the growing season FEC). These unfavorable scenarios projected for the growing season in Jalisco, show the need to develop strategies that allow reducing the impact of climate change on state agricultural production systems.

Keywords: global warming, growing stage, impact of climate change.

Introduction

Among the effects that climate change has and will have on the agro-climate from agricultural areas, is the one that refers to the growing season (EC), which is considered the most important and decisive agro-climatic parameter for crops under rainfed conditions. According to the digital map of land use V series, made by INEGI for Mexico (INEGI, 2013), 69% of agricultural land is cultivated under rainfed conditions while in Jalisco this percentage is 77.6%.

EC is defined as the period with adequate climatic conditions for crop growth and development, although within these conditions rainfall, temperature and solar radiation are critical. There are reports that climate change is directly affecting temperature conditions and indirectly precipitation conditions and solar radiation from all regions of the world (IPCC, 2013) including Mexico (Cavazos *et al.*, 2013) and the State of Jalisco in particular (Zarazúa *et al.*, 2011). These thermo-rainfall changes have already reflected in EC parameters (Ruiz *et al.*, 2000).

This trend is expected to continue during the XXI century, with its greatest impact in tropical and subtropical areas (Mora *et al.*, 2015) at low latitudes (<30°) and intermediate (30 to 60°). In the country and specifically in the state of Jalisco is under these geographical conditions. Considering a representative concentration path of greenhouse gases (Rcp) 8.5, Mora *et al.* (2015) reported through modeling, that the number of favorable days for plant growth shall be reduced globally by 11% for 2100. By then, these authors suggest that tropical areas could lose up to 200-day of growing season, generating a very adverse scenario for agricultural systems and for the socioeconomic context of these regions.

globalmente en 11% para el año 2100. Para entonces, estos mismos autores señalan que las áreas tropicales podrían perder incluso hasta 200 días de estación de crecimiento, generando un panorama bastante adverso para los sistemas agropecuarios y para el contexto socioeconómico de estas regiones.

La reducción en la EC debida al cambio climático generalmente tiene que ver con la disminución de la precipitación y por ende con la prevalencia de balances hídricos del suelo menos favorables para el desarrollo de cultivos (Ruiz *et al.*, 2000).

Otros reportes del impacto del cambio climático sobre la EC señalan efectos positivos. Esto es un incremento del período libre de heladas y en consecuencia del período de crecimiento debido al incremento de temperatura y disminución de días con temperatura sub-cero en regiones templadas y subtropicales (Easterling, 2002; Christiansen *et al.*, 2011). Otro efecto positivo del cambio climático sobre la EC ha sido señalado por diversos autores y es referente al alargamiento de la estación de crecimiento debido a la combinación de incremento de temperatura + incremento de CO₂ atmosférico, aunque Reyes-Fox *et al.* (2014) sugieren que una EC más larga debido al cambio climático obedece más a concentraciones mayores de CO₂, lo cual extiende el período activo de los ciclos de vida de plantas anuales. Estos autores señalan que lo anterior es más evidente en años y biomas donde el agua es un factor limitante.

Dentro de los estudios antecedentes relacionados con la evaluación del impacto del cambio climático sobre la EC se encuentra el reportado por Ruiz *et al.* (2000) referente a la evaluación del efecto del cambio climático de la segunda mitad del S.XX sobre la EC para maíz en el estado de Jalisco. Estos autores desarrollaron un estudio retrospectivo en el que compararon el período 1947-1971 vs 1972-1996. Sus resultados mostraron una reducción promedio de 6 días en la duración de la EC, producto de un retraso promedio de 2 días en la fecha de inicio de la EC y de un adelanto promedio de 4 días en la fecha de finalización de la EC durante el período 1972-1996. Esta disminución de la duración de la EC estuvo asociada a una reducción de la precipitación probabilística de los meses de junio, septiembre y octubre. De acuerdo con estos antecedentes y debido a que se carece de un estudio específico sobre los efectos que tendrá el cambio climático futuro sobre la estación de crecimiento en Jalisco, el objetivo de la presente investigación fue evaluar el impacto del cambio climático de los años 2050 y 2070 sobre los parámetros de la estación de crecimiento en el Estado de Jalisco.

The reduction in the EC due to climate change generally has to do with the reduction of rainfall and therefore with prevalence of water balances from less favorable soils for crop development (Ruiz *et al.*, 2000).

Other reports from the impact of climate change on EC reported positive effects. This is an increase of frost-free period and in consequence from the growth period due to increase in temperature and decrease in days with temperatures below zero in temperate and subtropical regions (Easterling, 2002; Christiansen *et al.*, 2011). Another positive effect of climate change on EC has been noted by several authors and is regarding the extent of the growing season due to a combination of temperature increase + increase atmospheric CO₂; although Reyes-Fox *et al.* (2014) suggest that a longer EC due to climate change obeys more to higher concentrations of CO₂, which extends the active lifecycles of annuals plants. These authors noted that the above is more evident in years and biomes where water is a limiting factor.

Within the background studies related with evaluations from impact of climate change on the EC can be found that reported by Ruiz *et al.* (2000) concerning the assessment of the impact of climate change in the second half of the twentieth century on EC for corn in the state of Jalisco. These authors developed a retrospective study in which compare the period 1947-1971 vs 1972-1996. Their results showed an average reduction of 6 days in the duration of EC, result of an average delay of two days on the initial date of EC and of an average advance of four days in the ending date of the EC during the period 1972-1996. This decrease in the duration of EC was associated to a reduction of probability of precipitation during June, September and October. According to this background and because there is a lack of a specific study on the effects that future climate change will have on the growing season in Jalisco, the aim of this study was to evaluate the impact of climate change in the years 2050 and 2070 on the parameters of the growing season in the state of Jalisco.

Materials and methods

Historical climate information

It worked with daily and monthly precipitation and temperature data for the period 1961-2010, from 133 weather stations in the state of Jalisco (Figure 1). In addition solar

Materiales y métodos

Información climática histórica

Se trabajó con datos diarios y mensuales de precipitación y temperatura correspondientes al período 1961-2010, de 133 estaciones meteorológicas distribuidas en el estado de Jalisco (Figura 1). Adicionalmente se utilizaron datos de radiación solar del período 1984-2014, que se obtuvieron del sitio de recursos climatológicos de la NASA (NASA, 2015).

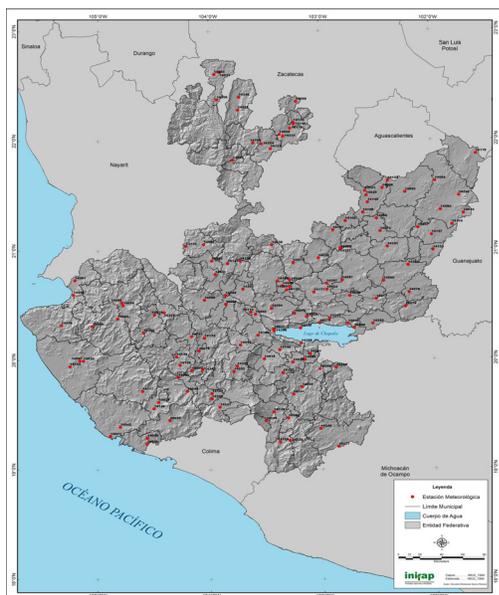


Figura 1. Distribución espacial de 134 estaciones meteorológicas en el estado de Jalisco, México.

Figure 1. Spatial distribution of 134 weather stations in the state of Jalisco, Mexico.

Información de cambio climático

La información de cambio climático utilizada en este estudio consistió en valores promedio mensuales de temperatura máxima, temperatura mínima, temperatura media y precipitación de los períodos 2041-2060 (representado por el año 2050) y 2061-2080 (representado por el año 2070) bajo la ruta representativa de concentración de gases efecto invernadero (Rcp) 4.5. Dicha información se deriva de la aplicación del modelo ensamble reportado por Ruiz *et al.* (2016) para la República Mexicana y se trabajó en el presente estudio a través de imágenes raster con resolución de 30" de arco. El modelo ensamble considera el consenso de 11 modelos de circulación general (MCG) reducidos en escala y calibrados (Walton *et al.*, 2013) y pertenecientes al CMIP5 (Intercomparación de Modelos Acoplados Fase

radiation data for the period 1984-2014, which were obtained from the website of climatological resources from NASA (NASA, 2015) were used.

Climate change information

Climate change information used in this study consisted of monthly average values of maximum temperature, minimum temperature, average temperature and precipitation for the periods 2041-2060 (represented by year 2050) and 2061-2080 (represented by year 2070) under representative concentration paths of greenhouse gases (Rcp) 4.5. This information derives from the application of the assembly model reported by Ruiz *et al.* (2016) for Mexico and were used in this study through raster images with a resolution of 30" arc. The assembly model considers the consensus of 11 general circulation models (GCM) reduced in scale and calibrated (Walton *et al.*, 2013.); and belonging to CMIP5 (Coupled Model Intercomparison Project Phase 5) BCC-CSM1-1, CCSM4, GISS-E2-R, HadGEM2-AO, HadGEM2-ES, IPSL-CM5A-LR, MIROC-ESM-CHEM, MIROC-ESM, MIROC5, MRI-CGCM3, NorESM1-M.

Determination of the growing season with historical climate information

With climate data for the period 1961-2010 the growing season of the 134 localities studied were determined. Such determination was made only considering the criterion of moisture availability in the soil and it was assumed that the occurrence of frost does not interfere with the growth period under rainfed conditions. The calculation of the EC was made with the method from FAO, which determines the beginning of EC when the rainy season starts, $p \geq 0.5$ ETP, where P is rainfall and ETP is the potential evapotranspiration or of reference (FAO, 1978). In this study the precipitation was considered in terms of the expected monthly rainfall at 70% probability, for which the probability of rain was calculated with the theoretical distribution that best fits to each series of monthly precipitation data; for this procedure SICA 2.5 (Medina *et al.*, 2003) program was used, which considers normal distributions, log-normal and incomplete range. Monthly ETP values were estimated using the Penman-Monteith method using the ETo Calculator program Ver. 3.2 (FAO, 2012). The end date of EC was estimated when $p < 0.37$ ETP (Ruiz, 1994). Once all the above calculations are made, the values of probabilistic rain and ETP obtained were

5): BCC-CSM1-1, CCSM4, GISS-E2-R, HadGEM2-AO, HadGEM2-ES, IPSL-CM5A-LR, MIROC-ESM-CHEM, MIROC-ESM, MIROC5, MRI-CGCM3, NorESM1-M.

Determinación de la estación de crecimiento con información climática histórica

Con los datos climáticos del período 1961-2010 se determinó la estación de crecimiento de las 134 localidades estudiadas. Dicha determinación se hizo considerando solamente el criterio de disponibilidad de humedad en el suelo y se asumió que la ocurrencia de heladas no interfiere en el período de crecimiento bajo condiciones de temporal. El cálculo de la EC se realizó con el método de la FAO, el cual determina el inicio de la EC cuando al empezar la estación de lluvias, $p \geq 0.5$ ETP, donde P es precipitación y ETP es la evapotranspiración potencial o de referencia (FAO, 1978). En el presente estudio se consideró la precipitación en términos de la lluvia mensual esperada al 70% de probabilidad, para lo cual se calcularon probabilidades de lluvia con la distribución teórica que mejor se ajustó a cada serie de datos mensuales de precipitación; para este procedimiento se utilizó el programa SICA 2.5 (Medina *et al.*, 2003), el cual considera las distribuciones normal, log-normal y gama incompleta. Los valores mensuales de ETP se estimaron con el método de Penman-Monteith haciendo uso del programa ETo Calculator Ver. 3.2 (FAO, 2012). La fecha de finalización de la EC se estimó cuando $p < 0.37$ ETP (Ruiz, 1994). Al terminar todos los cálculos anteriores, los valores de lluvia probabilística y ETP obtenidos, se vaciaron en hoja de Excel para mediante formulación y graficación obtener la fecha de inicio de la estación de crecimiento (FIEC), la fecha de finalización de la estación de crecimiento (FFEC) y la duración de la estación de crecimiento (DEC) para cada una de las estaciones climatológicas estudiadas.

Modelación de parámetros de la estación de crecimiento

Con el propósito de determinar los parámetros de la estación de crecimiento para escenarios de cambio climático y para la climatología 1961-2010, se procedió a generar modelos para estimar la FIEC, la FFEC y la DEC. Para ello se analizaron como posibles variables explicativas (variables asociadas a la variación de la FIEC, FFEC, DEC) los valores normales mensuales, estacionales y anuales de precipitación, temperatura media y cociente precipitación/temperatura media. Se seleccionaron las variables explicativas con un mayor coeficiente de correlación con respecto a FIEC, FFEC y DEC para formar los modelos.

emptied into an Excel spreadsheet through formulation and plotting to obtain the beginning date of the growing season (FIEC), the end date of the growing season (FFEC) and duration of the growing season (DEC) for each of the weather stations under study.

Modeling parameters of the growing season

In order to determine the parameters of the growing station, scenarios for climate change and for climatology 1961-2010, proceeded to generate models to estimate FIEC, FFEC and DEC. For this were analyzed as potential explanatory variables (variables associated with the variation of FIEC, FFEC, DEC) monthly, seasonal and annual normal values of precipitation, mean temperature and precipitation ratio/average temperature. Explanatory variables with a higher correlation coefficient regarding FIEC, FFEC and DEC to form models were selected.

Evaluating impact of climate change on the growing season

With the predictive models obtained for FIEC, FFEC and DEC generated state maps of these variables for the years 2050, 2070 and 1961-2010 (reference climatology).

Results and discussion

Determining the growing season

The results from the calculation of probability of rain and estimation of potential evapotranspiration allowed to estimate the basic parameters from the growing season in the 134 localities studied (Figure 2).

All localities analyzed showed growing season, except for the town Ojuelos, which showed probabilistic precipitation values that were not enough to overcome the ETP value required to begin EC. In the graphs from Figure 2 in can be observed this fact since the bar from this site remains at axis level "X". This locality and region from the state had been previously reported with zero days of growing season by other authors (Ruiz *et al.*, 2000). As can be seen in Figure 2, the parameters of the growing season show variation among sites, which is the result of varying weather conditions both in space (Medina *et al.*, 1998) and time (SMN, 2015) through their different agro-ecological regions.

Evaluación del impacto del cambio climático en la estación de crecimiento

Con los modelos predictivos obtenidos de FIEC, FFEC y DEC se generaron mapas estatales de estas variables para los años 2050, 2070 y 1961-2010 (climatología de referencia).

Resultados y discusión

Determinación de la estación de crecimiento

Los resultados del cálculo de probabilidades de lluvia y de la estimación de la evapotranspiración potencial permitieron estimar los parámetros básicos de la estación de crecimiento en las 134 localidades estudiadas (Figura 2).

Todas las localidades analizadas presentaron estación de crecimiento, con excepción de la localidad de Ojuelos, la cual presentó valores probabilísticos de precipitación que no fueron suficientes para superar el valor de ETP requerido para dar inicio a la EC. En las gráficas de la Figura 2 se puede apreciar este hecho, ya que la barra de este sitio se mantiene a nivel del eje "X". Esta localidad y región del Estado ya había sido previamente reportada con cero días de estación de crecimiento por otros autores (Ruiz *et al.*, 2000). Como puede notarse en la Figura 2, los parámetros de la estación de crecimiento presentan variación entre sitios, lo que es el resultado de condiciones climáticas variantes tanto en espacio (Medina *et al.*, 1998) como en tiempo (SMN, 2015) a través de sus distintas regiones agroecológicas.

Estas variaciones entre sitios son más evidentes en cuanto a la DEC, lo cual es indicador de las diferentes potencialidades de producción de biomasa y de patrón de cultivos y genotipos que prevalecen en las distintas regiones del estado. La mayor parte de las localidades analizadas ubican el inicio de EC entre los días julianos 151 y 200, esto es, entre el 31 de mayo y el 19 de julio; la fecha de finalización de la EC entre el día juliano 273 y 304, esto es entre el 30 de septiembre y el 31 de octubre, y; la DEC entre 100 y 140 días, lo cual explica, porque Jalisco es considerado uno de los estados más importantes en cuanto a producción agrícola bajo condiciones de temporal en el país (SIAP, 2015).

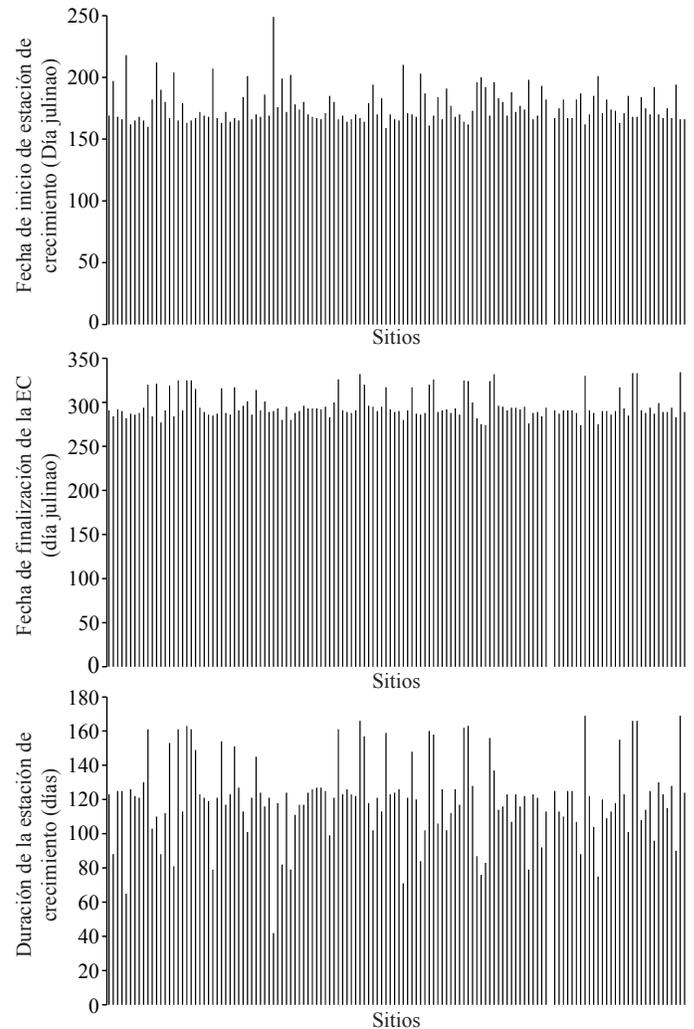


Figura 2. Variación de la estación de crecimiento en 134 localidades del estado de Jalisco, México.

Figure 2. Variation of the growing season in 134 localities from the state of Jalisco, Mexico.

Modeling growing season

Figure 3 graphically depicts the relationship of the variables that led to models to estimate the parameters of the growing season. By analyzing the correlation coefficients indices from the independent variables considered, with the parameters of the growing season, it was found that the beginning date (Julian day) of the growing season was the parameter that best correlated with the independent variables. Within these correlations, the variable precipitation ratio / average temperature from June (CPT6) correlated best with beginning date of the growing season (DjIEC) ($r = -0.87$; significant $p < 0.05$). In the upper graph from Figure 3 it can be observed that the relationship between these two variables is logarithmic, which gave rise to the following estimation model:

Modelación de la estación de crecimiento.

En la Figura 3 se describen gráficamente las relaciones de variables que dieron origen a los modelos para estimar los parámetros de la estación de crecimiento. Al analizar los índices de correlación de las variables independientes consideradas, con los parámetros de la estación de crecimiento, se obtuvo que la fecha (día juliano) de inicio de la estación de crecimiento fue el parámetro que mejor correlacionó con las variables independientes. Dentro de estas correlaciones, la variable cociente precipitación/temperatura media del mes de junio (CPT6) fue la que mejor correlacionó con la fecha de inicio de la estación de crecimiento (DjIEC) ($r = -0.87$; significativo $p < 0.05$). En la gráfica superior de la Figura 3 se puede observar que la relación entre estas dos variables es de tipo logarítmico, lo que dio origen al siguiente modelo estimativo:

$$DjIEC = -33.06 \ln(CPT6) + 234.91 \quad (r^2 = 0.80; n = 133) \quad 1)$$

Donde: DjIEC= día juliano de la fecha de inicio de la estación de crecimiento; Ln= logaritmo natural; CPT6= cociente precipitación/temperatura media para el mes de junio.

Para estimar la duración de la estación de crecimiento se observó que la variable explicativa que mejor correlacionó con este parámetro fue precisamente la fecha de inicio de la estación de crecimiento (Figura 3 gráfica inferior; $r = -0.85$, significativo $p < 0.05$), siendo esta relación de tipo exponencial, por lo que el modelo estimativo obtenido fue:

$$DEC = 1527.9e^{-0.015DjIEC} \quad (r^2 = 0.83; n = 133) \quad 2)$$

Donde: DEC= duración de la estación de crecimiento (días)

En el caso de la fecha de finalización de la estación de crecimiento, no existieron correlaciones altas y significativas con ninguna variable independiente, por lo que se decidió estimar esta variable de la siguiente manera:

$$DjFEC = DjIEC + DEC \quad 3)$$

Impacto del cambio climático sobre la estación de crecimiento

Con la aplicación de las expresiones (1), (2) y (3) sobre las imágenes de normales climatológicas para los períodos 1961-2010, 2050 y 2070, se obtuvieron las imágenes estatales de DjIEC, DjFEC y DEC. En la Figura 4 se pueden ver los cambios esperados para la DEC en los años 2050 y 2070 con relación a la climatología de referencia

$$DjIEC = -33.06 \ln(CPT6) + 234.91 \quad (r^2 = 0.80; n = 133) \quad 1)$$

Where: DjIEC= julian day of the beginning date of the growing season; Ln= natural logarithm, CPT6= precipitation ratio/average temperature for June.

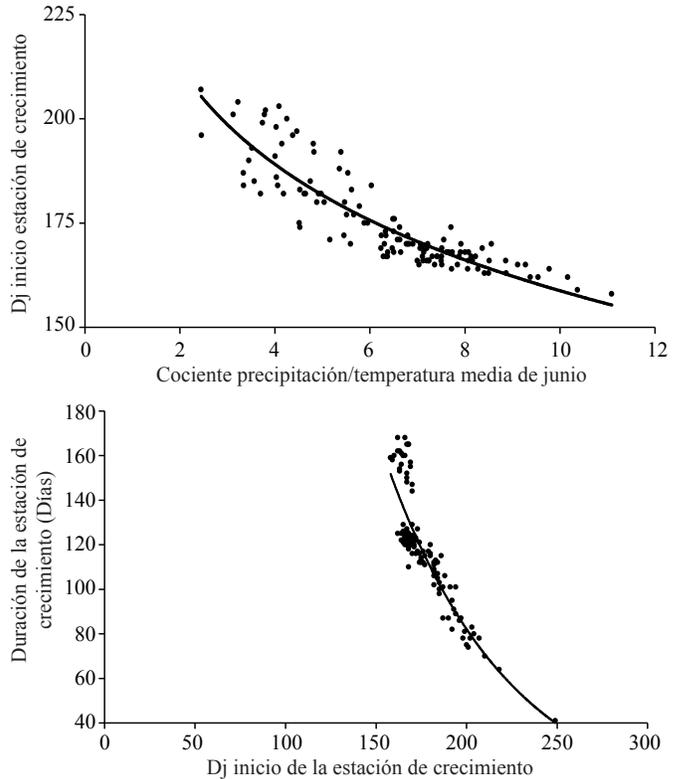


Figura 3. Relación entre CPT del mes de junio y fecha de inicio de la estación de crecimiento (arriba), y relación entre la fecha de inicio y duración de la estación de crecimiento (abajo).

Figure 3. Relationship between CPT in June and beginning date of the growing season (above), and the relationship between the beginning date and duration of the growing season (below).

To estimate the duration of the growing season it was observed that the explanatory variable that best correlated with this parameter was precisely the beginning date of the growing season (Figure 3 lower graph; $r = -0.85$, significant $p < 0.05$), being this relationship of exponential type, so the estimation model obtained was:

$$DEC = 1527.9e^{-0.015DjIEC} \quad (r^2 = 0.83; n = 133) \quad 2)$$

Where: DEC= duration of the growing season (days)

As for the end date of the growing season, there were no high and significant correlations with any independent variable, so it was decided to estimate this variable as follows:

1961-2010. Como puede notarse, la distribución espacial de la DEC muestra una disminución paulatina de DEC a costa de intervalos más favorables. Esto es, la disminución paulatina del intervalo 150-180 días hasta casi desaparecer en 2070. En el otro extremo, la condición de cero días de DEC que actualmente prevalece en el municipio de Ojuelos, no mejorará con el avance del cambio climático, este municipio continuará sin días de DEC. Según el mapa correspondiente a la climatología 1961-2010 de la Figura 4, actualmente el intervalo predominante de DEC es 120 a 150 días; sin embargo para el año 2050 ésta predominancia recaerá en el intervalo de 90-120 días, esto es que el cambio climático causará una reducción de este parámetro.

Esta reducción se acentuará para el año 2070, ya que la cobertura territorial del intervalo 120-150 días disminuirá aún más, mientras que el intervalo 90-120 días ganará más terreno, provocando incluso que en 2050 aparezca de manera muy visible una zona con DEC < 90 días en la parte central de la región costera del Estado, la cual avanzará territorialmente en 2070 (Figura 4). Esto podría explicarse por una posible evolución regional hacia climas más secos con el cambio climático, esto es la prevalencia de condiciones atmosféricas que no promueven precipitaciones. Actualmente la región se clasifica entre clima semiseco BS₁ y clima cálido subhúmedo Aw₀ (García, 2004), por lo que el clima tendería más hacia BS₁ con el cambio climático del S. XXI.

Este panorama de reducción de la DEC durante el S. XXI señala un panorama adverso que traerá consigo el cambio climático para la productividad agrícola en el Estado, situación que ya ha sido señalada previamente para las regiones de latitudes bajas (Parry *et al.*, 1999). La reducción en la DEC trae como consecuencia una reducción en los rendimientos de los cultivos (Kang *et al.*, 2009); sin embargo, las áreas agrícolas del estado con alta capacidad de almacenamiento de humedad del suelo podrían amortiguar esta pérdida de rendimiento en alguna medida, de tal manera que el impacto del cambio climático no se sintiera de manera tan significativa.

Una estrategia para hacer frente a esta reducción de la DEC, podría ser la obtención de nuevas variedades, más precoces pero con nivel de rendimiento igual o superior a las actuales, lo cual es un reto, ya que por lo general ciclos de maduración más cortos producen menores rendimientos de grano y materia seca. De aquí que otras opciones de adaptación a estas probables nuevas condiciones de DEC podrían ser el cambio de patrón de

$$DjFEC = DjIEC + DEC \quad 3)$$

Impact of climate change on the growing season

With the application of expressions (1), (2) and (3) on normal climatological images for the periods 1961- 2010, 2050 and 2070, the state images of DjIEC, DjFEC and DEC were obtained. Figure 4 shows the expected changes for DEC by 2050 and 2070 regarding reference climatology 1961-2010. As can be seen, the spatial distribution of DEC shows a gradual decrease of it at the expense of more favorable intervals. That is, the gradual reduction of the interval 150-180 days to almost nothing in 2070. At the other extreme, the condition of zero days of DEC currently prevailing in the municipality of Ojuelos, won't improve with the advance of climate change, this municipality will continue without DEC days. According to the corresponding climatology 1961-2010 from Figure 4, currently the predominant DEC interval is 120 to 150 days however by 2050 this predominance will fall to an interval of 90-120 days; this is that climate change will cause a reduction of this parameter.

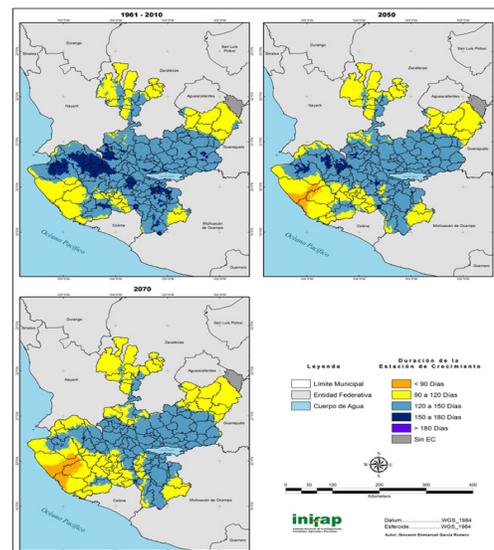


Figura 4. Cambios esperados para la duración de la estación de crecimiento en los años 2050 y 2070, con relación a la climatología de referencia (1961-2010).

Figure 4. Expected changes for the duration of the growing season in 2050 and 2070 regarding reference climatology (1961-2010).

This reduction will accentuate by 2070, as the territorial coverage of the interval 120-150 days will decrease even more, while the interval 90-120 days will gain more ground, causing even the appearance by 2050 of a very visibly area with DEC < 90 days in the central part of the coastal region

cultivos, procurando especies de menor requerimiento hídrico y de estación de crecimiento, y, la promoción de prácticas para mejorar la capacidad de almacenamiento de humedad del suelo.

El recorte de los días de DEC en el estado se debe básicamente a cambios que se verifican también en la fecha de inicio y finalización de la estación de crecimiento. En las Figuras 5 y 6 se pueden ver los cambios que traerá consigo el cambio climático de 2050 y 2070 para la FIEC y FFEC, respectivamente. La Figura 5 muestra que las fechas más tempranas de IEC se irán desplazando territorialmente por fechas más tardías. Así las zonas con IEC antes del 15 de junio prácticamente desaparecerán para el año 2070. La FIEC predominante actual es del 15 al 30 de junio, lo cual apenas se mantendrá para el año 2050, pero para 2070 predominará la FIEC del 30 de junio al 15 de julio. En la Figura 6 se ve como el intervalo más favorable de FFEC, esto es, 15 a 30 de noviembre, se reducirá en 2050 y desaparecerá para 2070. Además, el intervalo actual más representativo de FFEC en Jalisco es 31 octubre-15 noviembre, el cual para 2050 disminuirá en superficie y para 2070, será desplazado como el más representativo por la FFEC previa al 31 de octubre.

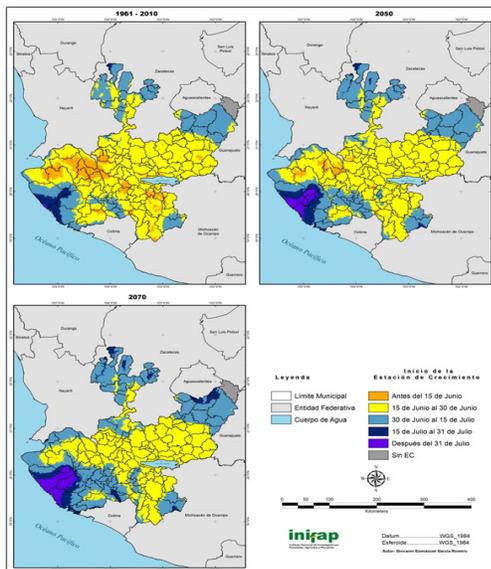


Figura 5. Cambios esperados para la fecha de inicio de la estación de crecimiento en los años 2050 y 2070, con relación a la climatología de referencia (1961-2010).

Figure 5. Expected changes for beginning date of the growing season in the years 2050 and 2070, regarding reference climatology (1961-2010).

from the state, which will advance territorially by 2070 (Figure 4). This could be explained by a possible regional evolution towards drier weather with climate change, this is the prevalence of atmospheric conditions that do not promote precipitation. The region is currently classified between semi-dry climate BS_1 and warm humid Aw_0 (Garcia, 2004), so that the weather would tend more to BS_1 with climate change from the twenty first century.

This panorama of reduction of DEC in the XXI century, points out to an adverse scenario that climate change will bring to agricultural productivity in the state, situation that has been previously pointed out for low-latitude regions (Parry *et al.*, 1999). The reduction in DEC results in a reduction of crop yields (Kang *et al.*, 2009); however, the agricultural areas of the state with high storage capacity of soil moisture could cushion this yield loss to some extent, so that the impact of climate change would not feel so significantly.

A strategy to cope with this reduction in DEC could be the development of new varieties, earlier but with yields equal to or higher than current, which is a challenge, as it usually shorter maturity cycles produce lower grain yields and dry matter. Hence other options to adapt to these new DEC conditions could be changing crop pattern, sowing species with lower water requirements and growing season, and promoting practices that improve storage capacity of moisture.

The reduction of DEC days in the State is due to changes occurring at beginning and end date of the growing station. In Figures 5 and 6 can be seen the changes that climate change will bring by 2050 and 2070 for FIEC and FFEC respectively. Figure 5 shows that the earliest dates of IEC will be replaced territorially by latest dates. So areas with IEC before June 15 will virtually disappear by 2070. The current dominant FIEC is from June 15 to 30, which barely will maintain for 2050 but for 2070 will the predominant FIEC will be from June 30 to July 15. In Figure 6 is looks like the most favorable interval of FFEC, that is, November 15 to 30, by 2050 will be reduced and by 2070 will disappear. In addition, the most representative interval of FFEC in Jalisco is October 31 to November 15, which by 2050 will decrease in surface 2050 and by 2070 it will be displaced as the most representative by a FFEC prior to October 31.

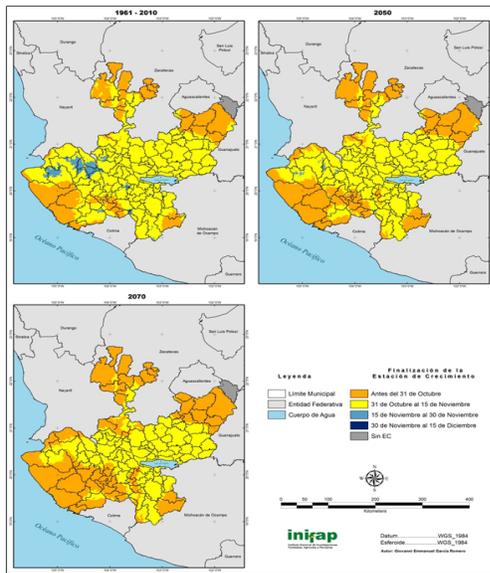


Figura 6. Cambios esperados para la fecha de finalización de la estación de crecimiento en los años 2050 y 2070, con relación a la climatología de referencia (1961-2010).

Figure 6. Expected changes for end date of the growing season in the years 2050 and 2070, regarding reference climatology (1961-2010).

En la Figura 7, se pueden evidenciar más claramente los efectos negativos del cambio climático de los años 2050 y 2070 sobre los parámetros de la EC. En primer término aparecen en dicha figura, los mapas que manifiestan regiones con diferente nivel de pérdida de días de DEC. Para el año 2050 esta pérdida es predominantemente de 0 a -14 días, situación que permite visualizar el tipo de condiciones agroclimáticas a las que se tendrán que enfrentar los sistemas de producción agrícola estatales. Para el año 2070, la pérdida en DEC predominante oscila entre -7 y -14 días, dependiendo de la región del Estado, pero con una presencia territorial considerable de otras pérdidas más drásticas, tales como aquellas que van de -14 a -28 días en la porción suroeste del Estado, en donde el acortamiento de la EC ya será alarmante.

El segundo par de mapas de la Figura 7 describe la pérdida en días para la estación de crecimiento, debida a un retraso en el inicio de la EC. Así se tiene que en 2050 el retraso en el IEC será de 0 a 21 días, mientras que en 2070 será de 0 a 28 días.

El tercer par de mapas de la Figura 7, se refiere a la pérdida en días de la estación de crecimiento, pero ahora ocasionada por un adelanto en la fecha de finalización de la EC. Como puede notarse en estos mapas, el impacto del cambio climático será menor sobre la FEC, esto es que su impacto en adelantar la fecha de finalización de la EC será menos significativo

In Figure 7 it can be shown more clearly the negative effects from climate change by 2050 and 2070 on EC parameters. In this figure appear the maps that show regions with different levels of absence of DEC days. By 2050 this loss is predominantly from 0 to -14 days, a situation that allows visualizing the type of agro-climatic conditions which will face the state agricultural production systems. By 2070, the loss in predominant DEC ranges between -7 and -14 days, depending on the region from the state, but with considerable territorial presence of other more drastic losses such as those ranging from -14 to -28 days in the southwestern portion of the state, where the shortening of EC will be alarming.

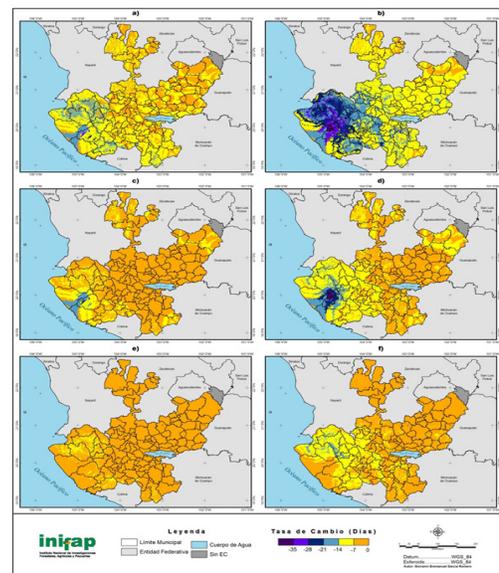


Figura 7. Pérdida en días para: la DEC en 2050 (a) y 2070 (b); para: el IEC (atraso) en 2050 (c) y 2070 (d); así como para: la FEC (adelanto) en 2050 (e) y 2070 (f).

Figure 7. Loss in days for: DEC in 2050 (a) and 2070 (b); for: IEC (delay) in 2050 (c) and 2070 (d); as well as for: FEC (advance) in 2050; and (e) and 2070 (f).

The second pair of maps in Figure 7, describes the loss in days for growing season, due to a delay in the beginning of EC. So by 2050 the delay in IEC will be from 0 to 21 days, whereas in 2070 it will be from 0 to 28 days.

The third pair of maps in Figure 7 refers to the loss in days of the growing season, but now caused by an advance on the end date of EC. As can be seen in these maps, the impact of climate change will be lower on FEC, this is that their impact on moving the end date of EC will be less significant than the effect that this phenomenon will have on the delay of the beginning date of EC. Hence the effect of climate change in the reduction of DEC both in 2050 and 2070, will focus mainly on a delay in the beginning of EC.

que el efecto que tendrá este fenómeno sobre el retraso del inicio de la EC. De aquí que el efecto del cambio climático en la reducción de la DEC tanto en 2050 como en 2070, se centrará mayormente en un retraso en el inicio de la EC.

Con lo expuesto anteriormente, es necesario empezar a diseñar estrategias para contrarrestar en lo posible dichos efectos del cambio climático. Dichas estrategias deberían contemplar el uso y manejo eficiente del agua y del suelo, incluyendo la reducción de la intensidad de labranza; las siembras en seco (cuando sea factible); el mejoramiento genético de cultivos orientado a desarrollo de variedades de ciclo más corto y con tolerancia a estrés climático. La rotación de cultivos, los cultivos en fajas con diferentes requerimientos de humedad y otras.

Conclusiones

En el estado de Jalisco, existen diferencias inter-regionales para la fecha de inicio, fecha de finalización y duración de la estación de crecimiento.

Los parámetros IEC, FEC y DEC determinados con valores probabilísticos de lluvia, correlacionaron significativamente con estadísticos climáticos normales, lo que permitió obtener modelos que estiman aceptablemente los valores de dichos parámetros de la EC.

Mediante la implementación de dichos modelos con datos de temperatura y precipitación proyectados a futuro fue posible concluir que el cambio climático de los años 2050 y 2070 producirá una reducción de la estación de crecimiento en todas las regiones del estado de Jalisco, aunque con una magnitud variable.

Esta reducción de la estación de crecimiento será mayormente provocada por un retraso en el inicio de la EC, aunque el cambio climático también tendrá efecto en adelantar la fecha de finalización de la EC.

Los escenarios desfavorables proyectados para la estación de crecimiento en Jalisco, señalan la necesidad de diseñar estrategias tecnológicas que aborden esta futura situación y que permitan reducir el impacto de éstos sobre los sistemas de producción agrícola estatales. Dichas estrategias deberían contemplar el uso y manejo

With the above, it is necessary to start designing strategies to reduce such effects of climate change. These strategies should address to use and management of water and soil, including the reduction of intensive tillage; dry plantings (where feasible); breeding crop varieties aimed at developing shorter cycle and tolerant climatic stress; crop rotation, strip cropping with different moisture requirements and others.

Conclusions

In the state of Jalisco, there are inter-regional differences between regions for beginning date, end date and duration of the growing season.

The IEC, FEC and DEC parameters determined with probabilistic values of rainfall, correlated significantly with normal weather statistics, which allowed obtaining models that reasonably estimate the values of these parameters EC.

By implementing these models with temperature and precipitation data projected in the future was possible to conclude that climate change by 2050 and 2070 will produce a reduction in the growing season in all regions from the state of Jalisco, although with a variable magnitude.

This reduction in the growing season will be mostly caused by a delay in the beginning of EC, although climate change will also have effect on advancing the end date of EC.

The worst-case scenarios projected for the growing season in Jalisco, points out the need to design technology strategies to address this future situation and that will allow reducing the impact of this on state agricultural production systems. These strategies should address the efficient use and management of water and soil, including reducing intensive tillage; dry plantings (where feasible); breeding crop varieties aimed at developing shorter cycles and tolerant to climatic stress; crop rotation, strip cropping with different moisture requirements and others.

End of the English version



eficiente del agua y del suelo, incluyendo la reducción de la intensidad de labranza; las siembras en seco (cuando sea factible); el mejoramiento genético de cultivos orientado a desarrollo de variedades de ciclo más corto y con tolerancia a estrés climático. La rotación de cultivos, los cultivos en fajas con diferentes requerimientos de humedad y otras.

Agradecimientos

Este artículo es producto del Proyecto INIFAP 1228033017: Cambio climático y su impacto sobre el rendimiento, producción y viabilidad del cultivo de maíz en las áreas agrícolas de México.

Literatura citada

- Cavazos, T.; Salinas, J. A.; Martínez, B.; Colorado, G.; de Grau, P.; Prieto-González, R.; Conde-Álvarez, A. C.; Quintanar-Isaías, A.; Santana-Sepúlveda, J. S.; Romero-Centeno, R.; Maya-Magaña, M. E.; Rosario de La Cruz, J. G.; Ayala-Enríquez, Ma. del R.; Carrillo-Tlazazanatz, H.; Santiesteban, O. y Bravo, M. E. 2013. Actualización de escenarios de cambio climático para México como parte de los productos de la quinta comunicación nacional. Informe Final del Proyecto al INECC. 150 pp.
- Christiansen, D. E.; Markstrom, S. L. and Hay, L. E. 2011. Impacts of climate change on the growing season in the United States. *Earth Interactions*. 15(33):1-17.
- Easterling, D. R. 2002. Recent changes in frost days and the frost-free season in the United States. *Bulletin of the American Meteorological Society*. 83(9):327-1332.
- FAO. 1978. Agroecological zones project. World soil resources. Africa. Geneva, Switzerland. 48(1):158.
- FAO. 2012. Program ETo calculator: evapotranspiration from a reference surface. FAO Land and Water Digital Media Series Num. 36. Rome, Italy.
- García, E. 2004. Carta de climas "Jalisco". Climatología de la República Mexicana. Proyecto CONABIO-Estadigrafía. México, D.F.
- INEGI. 2013. Conjunto de datos vectoriales de la carta de uso del suelo y vegetación. Serie V. Continuo Nacional. Escala 1:250,000. Aguascalientes, Aguascalientes, México.
- IPCC. 2013. The physical science basis. Working group I contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Summary for Policymakers. *In*: Stocker, T. F.; Dahe, Q.; Gian-Kasper, P.; Melinda, M. B.; Tignor, Simon, K. A.; Judith, B.; Alexander, N.; Yu, X.; Bex, V. and Midgley, M. P. (Eds.). Switzerland. 27 p.
- Kang, Y.; Kang, S. and Ma, X. 2009. Climate change impacts on crop yield, crop water productivity and food security - A review. *Progress in Natural Science* 19:1665-1674.
- Mora, C.; Caldwell, I. R.; Caldwell, J. M.; Fisher, M. R.; Brandon, M. G. and Running, S. W. 2015. Suitable days for plant growth disappear under projected climate change: potential human and biotic vulnerability. *PLOS Biology*. 587 p.
- Medina, G. G.; Ruiz, C. J. A. y Martínez, P. R. A. 1998. Los climas de México: una estratificación ambiental basada en el componente climático. Guadalajara, Jalisco, México. INIFAP-CIRPAC. Guadalajara, Jalisco, México. 103 p.
- Medina, G. G.; Ruiz, C. J. A. y María, R. A. 2003. SICA: sistema de información para caracterizaciones agroclimáticas ver. 2.5; documentación y manual del usuario. Tema didáctico Núm. 2. Publicación electrónica. INIFAP-CIRNOC-Campo Experimental Calera. Calera de V.R., Zacatecas 72 p.
- NASA. 2015. Recursos climatológicos. <http://power.larc.nasa.gov/cgi-bin/cgiwrap/solar/agro.cgi?email=agroclim@larc.nasa.gov>.
- Parry, M.; Rosenzweig, C.; Iglesias, A.; Fischer, G. and Livermore, M. 1999. Climate change and world food security: A new assessment. *Global Environmental Change*, 9: S51-S67.
- Reyes-Fox, M.; Steltzer, H.; Trlica, M. J.; McMaster, G. S.; Andales, A. A.; LeCain, D. R. and Morgan, J. A. 2014. Elevated CO₂ further lengthens growing season under warming conditions. *Nature*. 510:259-262.
- Ruiz, C. J. A. 1994. La estación de crecimiento en la región sur de Zacatecas. *Boletín informativo mensual* (349):16-22. Instituto de Astronomía y Meteorología. Universidad de Guadalajara. Guadalajara, Jalisco. 245 pp.
- Ruiz, C. J. A.; Ramírez, D. J. L.; Flores, M. F. J. y Sánchez, G. J. J. 2000. Cambio climático y su impacto sobre la estación de crecimiento de maíz en Jalisco, México. *Rev. Fitotec. Mex.* 23(2):169-181.
- SMN. 2015. Normales climatológicas por estación. http://smn.cna.gob.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=42&Itemid=75.
- SIAP. 2015. Agricultura: producción anual. <http://www.siap.gob.mx/agricultura-produccion-anual>.
- Walton, D.; Meyerson, J. and Neelin, J. D. 2013. Accessing, downloading, and viewing CMIP5 Data. *Earth System Grid Federation*. 25 p.
- Zarazúa, V. P.; Ruiz, C. J. A.; González, E. D. R.; Flores, L. H. E. y Ron, P. J. 2011. Impactos del cambio climático sobre la agroclimatología del maíz en la Ciénega de Chapala, Jalisco. *Rev. Mex. Cienc. Agríc.* 3(2):351-363.