

CAMBIO CLIMÁTICO Y SUS IMPLICACIONES EN CINCO ZONAS PRODUCTORAS DE MAÍZ EN MÉXICO*

CLIMATE CHANGE AND ITS IMPLICATIONS IN FIVE PRODUCING AREAS OF MAIZE IN MEXICO

José Ariel Ruiz Corral^{1§}, Guillermo Medina García², José Luis Ramírez Díaz¹, Hugo Ernesto Flores López¹, Gabriela Ramírez Ojeda¹, José Damián Manríquez Olmos¹, Patricia Zarazúa Villaseñor³, Diego Raymundo González Eguiarte³, Gabriel Díaz Padilla⁴ y Celia de la Mora Orozco¹

¹Campo Experimental Centro-Altos de Jalisco. INIFAP. Carretera libre Tepatitlán-Lagos de Moreno, km 8. Tepatitlán, Jalisco, México. C. P. 47600. ²Campo Experimental Zacatecas. INIFAP. Carretera Zacatecas-Fresnillo, km 24.5. Calera, Zacatecas, México. C. P. 98600. ³Centro Universitario de Ciencias Biológicas y Agropecuarias. Universidad de Guadalajara. Carretera Guadalajara-Nogales, km 15.5. ⁴Campo Experimental Cotaxtla. INIFAP. Carretera Veracruz-Córdoba, km 34.5. Medellín de Bravo, Veracruz, México. [§]Autor de correspondencia: ruiz.ariel@inifap.gob.mx.

RESUMEN

El objetivo de la presente investigación fue determinar las modificaciones agroclimáticas, que podrían estar asociadas con el cambio climático durante las primeras décadas del siglo XXI, en cinco zonas productoras de maíz en México. Para ello se trabajó con sistemas de información geográfica nacionales, tanto para la climatología actual como para la climatología esperada para tres décadas del siglo XXI (2011-2020, 2031-2040 y 2051-2060); la cual se estimó mediante la utilización de modelos de circulación general. Se analizaron los posibles cambios que podrían suscitarse para el periodo mayo-octubre, con relación a temperatura media (Tm), temperatura diurna (Td), temperatura nocturna (Tn), grados-día de desarrollo (GDD), precipitación (P), evapotranspiración potencial (ETP), índice de humedad calculado con base en la relación P/ETP (IH), y las áreas potenciales para maíz. Los resultados mostraron que entre 1961-2003 y 2051-2060, la temperatura media mayo-octubre se incrementará 1.9, 1.9, 2, 1.9 y 1.8 °C en las zonas trópico, subtrópico, transicional de altura, valles altos y valles muy altos, respectivamente. Mientras que la precipitación en esta temporada del año disminuirá 4.4, 3.8, 4.1, 4.5 y 4.4%, en las

ABSTRACT

The aim of this paper was to determine the agro-climatic changes that may be associated with climate change during the first decades of the XXI century, in five maize-producing areas in Mexico. This was achieved using national geographic information systems, both for current weather and, the expected weather for three decades of the XXI century (2011-2020, 2031-2040 and 2051-2060); which was estimated by using general circulation models. The changes that might arise for the period from May to October were analyzed, related to the average temperature (Tm), diurnal temperature (Td), night temperature (Tn), development degree-days (GDD), precipitation (P), potential evapotranspiration (ETP), moisture index calculated based on the ratio P/ETP (IH) and, the potential areas for maize. The results showed that, between 1961-2003 and 2051-2060, the average temperature from May to October will increase 1.9, 1.9, 2, 1.9 and 1.8 °C in the tropics, subtropics, height transitional, high valleys and, very high valleys as well, respectively. Meanwhile the precipitation in this season of the year will decrease 4.4, 3.8, 4.1, 4.5 and 4.4% in the very same areas. These

* Recibido: diciembre de 2010
Aceptado: julio de 2011

mismas zonas. Estos cambios se traducirán en un incremento de Td y Tn, así como de GDD y ETP. Este último incremento combinado con la disminución de la precipitación, producirá balances hídricos menos favorables para el cultivo; mientras que el incremento de temperatura nocturna provocará mayores tasas de respiración nocturna, y el incremento de GDD inducirá un acortamiento del ciclo de madurez de los genotipos de siembra. Todo ello en conjunto causará una reducción de la superficie con condiciones agroclimáticas óptimas, para la producción de maíz en las zonas trópico, subtropical y transicional, incremento de esta superficie en valles altos y valles muy altos. Estos resultados podrían utilizarse en el diseño de estrategias, para enfrentar el cambio climático en las áreas productoras de maíz en México.

Palabras clave: *Zea mays* L., aptitud agroecológica, cambio climático y agricultura, maíz.

INTRODUCCIÓN

El calentamiento global que experimenta actualmente el planeta, se debe básicamente al incremento en la concentración de gases de efecto invernadero (GEI), donde el CO₂ es el que mayor contribuye a este fenómeno (IPCC, 2007). Con base en numerosos estudios, existe un consenso general que las plantas presentan una respuesta positiva al incremento del CO₂; la cual se manifiesta a través del aumento en la fotosíntesis, la biomasa y el rendimiento económico de los cultivos (Kimball *et al.*, 2002; Tubiello *et al.*, 2007).

Se ha estimado que al incrementar al doble el contenido de CO₂ en promedio, el rendimiento económico se incrementa 30% en especies C₃ y alrededor de 10% en especies C₄ (Hatfield *et al.*, 2011; Izaurralde *et al.*, 2011). Con un contenido de CO₂ equivalente al doble del actual, la fotosíntesis en la hoja del maíz se incrementa 3% (Leakey *et al.*, 2006); mientras que la biomasa y el rendimiento económico se incrementan 4%, respectivamente (Maroco *et al.*, 1999; Leakey *et al.*, 2006).

Por otra parte, como resultado del aumento de los GEI en la atmósfera, se tiene un incremento en la temperatura; la cual dependiendo del régimen climático prevaleciente y la disponibilidad de recursos edáficos, puede tener efectos tanto positivos como negativos sobre el potencial productivo de los cultivos. Un aumento en la temperatura acelera el proceso de madurez de los cultivos, reduce la duración

changes will result in an increase of Td and Tn as well as in GDD and ETP. This latest increase combined with the decreasing precipitation will produce less favorable water balance for the crop; while the nighttime temperature increase will cause higher nocturnal respiration rates and, increased GDD will induce a shortening of the maturity cycle of the plant genotypes. All of this together will cause a reduction of the surface with optimal growing conditions for maize production in tropical areas, subtropical and transitional, with an increase of this surface in high valleys and very high valleys. These results could be used in the design of strategies to address the climatic change in the maize producing areas in Mexico.

Key words: *Zea mays* L., agro-ecological aptitude, climate change and agriculture, maize.

INTRODUCTION

The currently global warming experienced in the world, is mainly due to the increased concentration of greenhouse gases (GHG); CO₂ is the gas that contributes the most to this phenomenon (IPCC, 2007). Based on several studies, there is a general agreement that, the plants have a positive response to the increasing CO₂; which is manifested through the increase of photosynthesis, biomass and economic yield of crops (Kimball *et al.* 2002; Tubiello *et al.*, 2007).

It has been estimated that, by increasing twice the CO₂ content, the average economic yield will increase 30% in C₃ species and about 10% in C₄ species (Hatfield *et al.*, 2011; Izaurralde *et al.*, 2011). With a CO₂ content twice the current, the leaf photosynthesis of maize will increase 3% (Leakey *et al.*, 2006); while biomass and economic yield increase 4%, respectively (Maroco *et al.*, 1999; Leakey *et al.*, 2006).

On the other hand, as a result of increased GHG in the atmosphere, there is an increase in temperature too; which depending on the prevailing climate regime and, the availability of soil resources, may have both, positive and negative effects on the crops' productive potential. An increased temperature accelerates the crops' maturity; it reduces the foliar area duration and hence the total water requirement to crop maturity (Hatfield *et al.*, 2011; Ojeda *et al.*, 2011). However, when the ripening process of the plants

del área foliar y con ello el requerimiento hídrico total a la madurez del cultivo (Hatfield *et al.*, 2011; Ojeda *et al.*, 2011). Sin embargo, al acelerarse el proceso de madurez de las plantas, se acorta su ciclo biológico y por ende su etapa reproductiva, causando una disminución en el rendimiento económico de los cultivos (Zarazúa, 2011).

El incremento en la temperatura también modifica las tasas de evapotranspiración (ETP); que para evaluar el impacto potencial del cambio climático sobre la ETP del cultivo, se requieren estudios detallados que combinen variables climáticas y de cultivo relacionadas con la respuesta a la sensibilidad de la ETP. Cuando se mantienen constantes todas las variables que influyen en la ETP y sólo se incrementa la temperatura, la ETP de referencia aumenta 3.4% por cada grado Celsius de incremento (Kimball, 2007).

El cambio climático puede originar incrementos en la precipitación en algunas regiones y producir mayor biomasa; sin embargo, un incremento de la variabilidad de la lluvia conjugada con temperaturas más cálidas y desecantes puede conducir a sequías regionales (Izaurrealde *et al.*, 2011). Estudios recientes han demostrado que la temperatura de las áreas agrícolas de México se ha venido incrementando de manera perceptible desde la década de los años 1990's del siglo pasado (Ruiz *et al.*, 2010; Zarazúa *et al.*, 2011). Los escenarios climáticos predichos para el siglo XXI, establecen en términos generales, un incremento de la temperatura y una ligera disminución de la precipitación anual en las zonas de cultivo (Magaña y Caetano, 2007).

Lo anterior tendrá, como principales consecuencias, incremento en la evapotranspiración potencial, balance hídrico menos favorable, estación de crecimiento más corta en zonas tropicales y subtropicales, pero con igual o mayor acumulación de unidades calor, y estación de crecimiento igual o más amplia en la zona de los valles altos (Hatfield *et al.*, 2011; Ojeda *et al.*, 2011). El incremento en la temperatura y evapotranspiración, y la disminución de la precipitación, reducirán la aptitud de las tierras para producir maíz; así como el de su rendimiento económico (Ruiz *et al.*, 2010); además, la reducción del potencial productivo de los cultivos estará asociado con mayor dinamismo en la presencia de plagas, enfermedades y maleza (FAO, 2007).

En México se han realizado estudios sobre la temática de cambio climático y su impacto en la agricultura, pero pocos han analizado a detalle los efectos sobre sistemas productivos

is accelerated, its life cycle gets shortened and hence their reproductive stage, causing a decrease in the economic yield of the crops (Zarazúa, 2011).

The increase in temperature also modifies the evapotranspiration rates (ETP); in order to evaluate the potential impact of climate change on the crop's ETP, detailed studies are needed that combine the climatic and crop variables related to the response to the sensitivity of ETP. When all variables that influence the ETP kept constant and, only the temperature increases, the reference ETP increases 3.4% per increased Celsius degree (Kimball, 2007).

Climatic change may cause increased precipitation in some regions and even produce more biomass, but an increased variability of rainfall combined with warmer and drying temperatures, may lead to regional droughts (Izaurrealde *et al.*, 2011). Recent studies have shown that, the temperature of the agricultural areas of Mexico has increased noticeably since the early 1990's of the last century (Ruiz *et al.*, 2010; Zarazúa *et al.*, 2011). The climate scenarios predicted for the XXI century, set in general terms, an increase in temperature and a slight decrease of annual precipitation in the crop's areas (Magaña and Caetano, 2007).

This will have as main effects, an increased potential evapotranspiration, less favorable water balance, short growing season in tropical and subtropical areas, but with equal or greater accumulation of heat units and, the same or wider growing season at the high valleys area (Hatfield *et al.*, 2011; Ojeda *et al.*, 2011). The increase in temperature and evapotranspiration and reduced rainfall will reduce the ability of the land to grow maize as well as its economic yield (Ruiz *et al.*, 2010); the reduction of the productive potential of crops is associated with the presence of more pests, diseases and weeds (FAO, 2007).

In Mexico, there have been studies on climate change and its impact on agriculture, but only a few have analyzed in detail the effect on the systems-product relation, thus, limiting the design of adaptation strategies to climate change in this sector. The aim of this paper was to determine the agro-climatic changes that may be associated with climatic change during the first decades of the XXI century in the maize producing agricultural areas in Mexico.

en particular, lo cual limita el diseño de estrategias de adaptación al cambio climático en este sector. El objetivo de esta investigación fue determinar las modificaciones agroclimáticas, que podrían estar asociadas con el cambio climático durante las primeras décadas del siglo XXI, en las zonas agrícolas productoras de maíz en México.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se realizó en las zonas agrícolas productoras de maíz de temporal de México clasificadas como: valles muy altos (> 2 600 msnm), valles altos (2 200 a 2 600 msnm), zona de transición (1 900 a 2 200 msnm), zona subtropical (1 200 a 1 900 msnm) y zona tropical (< 1 200 msnm); las cuales corresponden a las áreas de adaptación del maíz definidas en el programa de mejoramiento genético de maíz del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP). Cabe hacer la aclaración que las denominaciones de trópico y subtrópico no necesariamente corresponden con el concepto geográfico de dichos términos, sino más bien con condiciones de temperatura que prevalecen en los estratos altitudinales correspondientes.

Sistema de información climática

Para caracterizar la climatología actual se utilizó el sistema de información ambiental nacional (SIAN) del INIFAP (Ruiz *et al.*, 2010), cuya información climatológica representa valores normales del período 1961-2003. Para simular el cambio climático a futuro se utilizó el sistema de información de cambio climático (SICC) del INIFAP (Ruiz *et al.*, 2010); el cual está basado en la utilización del modelo ensamble propuesto por Magaña y Caetano (2007), y proporciona valores climáticos ponderados con 10 modelos de circulación general (mpi_echam5, miub_echo_g, csiro_mk3_0, csiro_mk3_5, cccma_cgcm3_1, giss_model_e_r, ncar_ccsm3_0, miroc3_2_hires, mri_cgcm2_3_2^a, ukmo_hadcm3).

Con el SICC y el SIAN se calcularon desviaciones de las variables de estudio entre la climatología 1961-2003 y las décadas 2011-2020, 2031-2040 y 2051-2060, considerando el escenario de emisiones de gases efecto invernadero A2 (IPCC, 2007). Los sistemas de información utilizados se encuentran en formato raster y se manejaron mediante el sistema Idrisi Andes.

MATERIALS AND METHODS

The study was conducted in maize producing agricultural areas of rainfed in Mexico, classified as: very high valleys (> 2 600 masl), high valleys (2 200 to 2 600 masl), transition zone (1 900 to 2 200 masl), subtropical zone (1 200 to 1 900 masl) and, tropical zone (< 1 200 masl); which correspond to maize's adaptation areas defined by the maize breeding program of the National Research Institute for Forestry, Agriculture and Livestock (INIFAP). It's noteworthy that, the 'tropic' and 'subtropic' do not necessarily correspond with the geographical concept of these terms, but with the temperature conditions prevailing in the corresponding altitude strata.

Climate information system

In order to characterize the current climate, the national environmental information system was used (SIAN) of the INIFAP (Ruiz *et al.*, 2010), which represents normal weather data for the 1961-2003 period. For simulating the future climate change, the information system on climate change was used (SICC) of the INIFAP (Ruiz *et al.*, 2010), which is based on the use of assembly model proposed by Magaña and Caetano (2007), providing climate values using 10 general circulation models (mpi_echam5, miub_echo_g, csiro_mk3_0, csiro_mk3_5, cccma_cgcm3_1, giss_model_e_r, ncar_ccsm3_0, miroc3_2_hires, mri_cgcm2_3_2^a, ukmo_hadcm3).

Using the SICC and SIAN, deviations were calculated for the study variables between 1961-2003 climates and the 2011-2020, 2031-2040 and 2051-2060 decades, considering the A2 greenhouse gases emission scenario (IPCC, 2007). Information systems that were used are in raster format and were managed by the Idrisi Andes system.

Study variables

The changes that might arise for the May-October period were analyzed, related to the average values of mean temperature (Tm), diurnal temperature (Td), night temperature (Tn), development degree-days (GDD), precipitation (P), potential evapotranspiration (ETP) and, a moisture content calculated based on the ratio precipitation/potential evapotranspiration (IH). Except for GDD, IH, Td and Tn, all variables were taken from the information

Variables de estudio

Se analizaron los posibles cambios que podrían suscitarse para el periodo mayo-octubre con relación a los valores promedio de temperatura media (T_m), temperatura diurna (T_d), temperatura nocturna (T_n), grados días de desarrollo (GDD), precipitación (P), evapotranspiración potencial (ETP) y un índice de humedad calculado con base en la relación precipitación/evapotranspiración potencial (IH). Con excepción de GDD, IH, T_d y T_n , todas las variables fueron tomadas de los sistemas de información antes mencionados. Los GDD se calcularon con la ecuación $GDD = T_m - T_b$; donde: T_b = temperatura base o temperatura umbral mínima de desarrollo. Para este cálculo se consideró $T_b = 10^\circ\text{C}$; la cual es apropiada para maíces con adaptación tropical y subtropical (Shaw, 1975; Ruiz *et al.*, 2002). La T_d y T_n se calcularon con base en las siguientes expresiones (Ruiz *et al.*, 2003).

$$T_d = T_m + \frac{(T_x - T_i)(11 - T_o)}{4(12 - T_o) \text{Sen}\left[\pi \frac{11 - T_o}{11 + T_o}\right]}$$

$$T_n = T_m + \frac{(T_x - T_i)(11 - T_o)}{4(12 - T_o) \text{Sen}\left[\pi \frac{11 - T_o}{11 + T_o}\right]}$$

Donde: T_d = temperatura diurna; T_n = temperatura nocturna; $T_o = 12 - 0.5N$; N = fotoperiodo promedio mayo-octubre; Sen = seno expresado en radianes.

Criterios de clasificación del potencial productivo de las cinco zonas productoras de maíz

El potencial productivo para maíz se determinó sólo en las áreas de uso agrícola con condiciones de temporal, para lo cual se utilizó la imagen de áreas agrícolas derivadas de la carta de uso de suelo serie III del INEGI (INEGI, 2009). Se utilizó un sistema de potencial agroecológico cualitativo descrito en el Cuadro 1. Los rangos de temperatura y precipitación (Cuadro 1), se derivaron de funciones de producción de maíz de temporal basadas en ecuaciones cuadráticas propuestas por Ruiz *et al.* (2010). Se consideró como condición óptima de temperatura y precipitación, aquella que producía al menos 80% del rendimiento máximo de maíz.

systems just mentioned. The GDD were calculated using the equation $GDD = T_m - T_b$; where: T_b = base temperature or minimum threshold temperature of development. For this calculation was considered $T_b = 10^\circ\text{C}$, which is suitable for maize with tropical and subtropical adaptation (Shaw, 1975; Ruiz *et al.*, 2002). T_d and, T_n were calculated based on the following expressions (Ruiz *et al.*, 2003).

$$T_d = T_m + \frac{(T_x - T_i)(11 - T_o)}{4(12 - T_o) \text{Sen}\left[\pi \frac{11 - T_o}{11 + T_o}\right]}$$

$$T_n = T_m + \frac{(T_x - T_i)(11 - T_o)}{4(12 - T_o) \text{Sen}\left[\pi \frac{11 - T_o}{11 + T_o}\right]}$$

Where: T_d = diurnal temperature; T_n = night temperature; $T_o = 12 - 0.5N$; N = average photoperiod May-October; Sen = sine in radians.

Classification criteria of the productive potential of the five maize-producing areas

The production potential for maize was determined only in the areas of agricultural-use under rainfed conditions, using the image of agricultural areas resulting from land-use letter series III of INEGI (INEGI, 2009). A qualitative agro-ecological potential system was used as described in Table 1. The ranges of temperature and precipitation (Table 1) were derived from production functions of rainfed maize based on quadratic equations proposed by Ruiz *et al.* (2010). As optimal temperature and precipitation condition was considered the one that produced at least 80% of the maximum yield of maize.

RESULTS AND DISCUSSION

Agroclimatic parameters

When comparing the average temperature values of May-October of the five agricultural areas, it is obvious the temperature difference between them; as it goes from 14.4°C in very high valleys to 26.8°C in the tropical zone; indicating a great temperature diversity at which maize is grown in Mexico (Table 2).

Cuadro 1. Variables y criterios para determinar áreas potenciales de maíz en condiciones de temporal durante el periodo de mayo a octubre.

Table 1. Variables and criteria for identifying the potential areas for maize under rainfed conditions during the period from May to October.

Variable	Condición ambiental		
	Marginal	Subóptima	Óptima
Precipitación (mm)	<400 y >1 900	400 a 750 y 1 500 a 1 900	750 a 1500
Temperatura media (°C)	<11	11 a 18 y 24 a 30	18 a 24
Pendiente del suelo (%)	>12	4 a 12	<4
Uso del suelo	Agrícola	Agrícola	Agrícola

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Parámetros agroclimáticos

Al comparar los valores promedio de temperatura mayo-octubre de las cinco zonas agrícolas, es notoria la diferencia térmica que existe entre ellos; ya que va desde 14.4 °C en valles muy altos hasta 26.8 °C en la zona tropical; que indica la gran diversidad térmica en la que se cultiva el maíz en México (Cuadro 2).

Based on the results of the five agricultural regions of the country for three future decades it's observed that, the temperature will rise steadily until reaching in the 2051-2060 decade, an increase of 1.9, 1.9, 2, 1.9 and 1.8 °C in tropical, subtropical, transitional, high valleys and very high valleys zones, respectively; as compared to the reference average temperature of the 1961-2003 period (Table 2); these results are consistent with Sivakumar *et al.* (2005), who estimated for Africa a warming of 0.2 to 0.5 °C per decade; as well as those reported by Gay *et al.* (2004), who estimated for 2050 a temperature rise of 2 °C in the Summer.

Cuadro 2. Valores promedio de temperatura media y grados-día de desarrollo para maíz durante el ciclo de mayo-octubre en cinco zonas agrícolas de México bajo cuatro escenarios climáticos.

Table 2. Average values of mean temperature and, degree-days for maize development, during the May-October cycle in five agricultural-areas of Mexico, under four climatic scenarios.

Periodo	Variable	Zona ecológica				
		Trópico	Subtrópico	Transición	Valles altos	Valles muy altos
1961-2003	Temperatura media (°C)	26.8	21.2	18.9	16.6	14.4
2011-2020	Temperatura media (°C)	27.6	21.9	19.7	17.4	15.1
2031-2040	Temperatura media (°C)	28	22.3	20.1	17.8	15.5
2051-2060	Temperatura media (°C)	28.7	23.1	20.9	18.5	16.2
1961-2003	Grados-día de desarrollo	3091	2061	1638	1214	810
2011-2020	Grados-día de desarrollo	3238	2190	1785	1362	938
2031-2040	Grados-día de desarrollo	3312	2263	1858	1435	1012
2051-2060	Grados-día de desarrollo	3441	2410	2006	1564	1141

Con base en los resultados obtenidos en las cinco regiones agrícolas del país, para las tres décadas futuras, se observa que la temperatura aumentará sostenidamente hasta alcanzar en la década 2051-2060, un incremento de 1.9, 1.9, 2, 1.9 y 1.8 °C en las zonas trópico, subtrópico, transición, valles altos y valles muy altos, respectivamente; en comparación con la temperatura media de referencia del periodo 1961-2003 (Cuadro 2); estos resultados coinciden

The temperature increases indicated for the three future decades, would become increases of GDD for maize. Thus, the accumulated GDD from May to October in the subtropical region, which currently houses the most productive rainfed maize areas of the country (SIAP, 2010); will change from 2061 GDD in 1961-2003, to 2190, 2163 and 2410 average GDD for the 2011-2020, 2031-2040 and 2051-2060 decades, respectively; representing an increase

con Sivakumar *et al.* (2005), quienes estimaron para África un calentamiento de 0.2 a 0.5 °C por década; así como con los consignados por Gay *et al.* (2004), quienes estiman para el año 2050 un aumento de temperatura de 2 °C en la temporada de verano.

Los incrementos de temperatura señalados para las tres décadas futuras se traducirían en incrementos de GDD para el maíz. Así, los GDD acumulados mayo-octubre en la región subtropical, que actualmente alberga las áreas maiceras de temporal más productivas del país (SIAP, 2010); pasarán de 2061 GDD en 1961-2003 a 2190, 2163 y 2410 GDD promedio en las décadas de 2011-2020, 2031-2040 y 2051-2060, respectivamente; lo cual representa un incremento de 129, 202 y 349 GDD. Considerando los GDD totales mayo-octubre, se estima que la tasa diaria de acumulación de GDD de esta zona agrícola cambiaría de 11.2 GDD por día en 1961-2003, a 11.9, 12.3 y 13.1 GDD por día en 2011-2020, 2031-2040 y 2051-2060, respectivamente.

El incremento en la acumulación de GDD tiene un impacto sobre la aceleración de la fenología del maíz. Por ejemplo, el requerimiento térmico, tomando la $T_b = 10$ °C, del híbrido de maíz de ciclo intermedio-tardío H-311, representativo de la zona subtropical de México; es de 1 434 GDD (Ruiz *et al.*, 2002); al comparar la tasa de acumulación diaria de los GDD de las cuatro climatologías estudiadas, se encontró que en la climatología de referencia 1961-2003, se requieren en promedio $1434/11.2 = 128$ días para que este híbrido llegue a la madurez; en cambio, el mismo híbrido, en 2011-2020 requerirá $1434/11.9 = 121$ días; y en las décadas de 2031-2040 y 2051-2060 requerirá 117 y 110 días para completar su ciclo de madurez.

Estas estimaciones destacan de manera significativa el impacto que tendría el incremento de la temperatura sobre la fenología del maíz y su rendimiento; ya que al reducirse el ciclo de madurez, se acortan las etapas fenológicas (llenado de grano), se reduce el área foliar, disminuye la producción de fotosintatos y la producción de biomasa y grano. La pérdida de rendimiento por esta causa puede llegar a ser de entre 10 y 40% (Tubiello *et al.*, 2000; Hatfield *et al.*, 2011). Es importante señalar, que estos resultados pueden ser fundamentales para retroalimentar a los programas de mejoramiento genético de maíz de México; especialmente en el diseño de estrategias y en la selección tanto de

of 129, 202 and 349 GDD. Considering the total GDD from May to October, it's estimated that, the daily rate of GDD accumulation of this agricultural area will change from 11.2 GDD per day in 1961-2003, to 11.9, 12.3 and 13.1 GDD per day in 2011-2020, 2031-2040 and 2051-2060, respectively.

The increase of GDD accumulation has an impact on accelerating the phenology of maize. For example, the thermal requirement, taking the $T_b = 10$ °C, of the H-311 maize hybrid of intermediate-late cycle, which is representative of the Mexico's subtropical zone, is 1 434 GDD (Ruiz *et al.*, 2002); when comparing the GDD daily accumulation rate of the four studied climatology, it was found that, in the 1961-2003 reference climatology, it requires an average of $1434/11.2 = 128$ days for this hybrid to reach maturity; whereas the same hybrid in 2011-2020 will require $1434/11.9 = 121$ days; and for 2031-2040 and 2051-2060 decades it will require 117 and 110 days to complete its maturity cycle.

These estimates significantly emphasize the impact that, the temperature increase would have on the phenology of maize and its yield; by reducing the maturity cycle the phenological stages (grain filling) are also reduced, foliar area is also reduces, photosynthate production decreases, also biomass and grain too. Yield loss from this cause, may be between 10 and 40% (Tubiello *et al.*, 2000; Hatfield *et al.*, 2011). These results could be critical to provide feedback to the genetic improvement programs of maize in Mexico; especially in the strategies design and, the selection of both evaluation sites and germplasm in order to create successfully improved maize varieties in scenarios of climatic change.

However, the time to start research in maize breeding with this approach must be immediate, because the climate change is not a phenomenon that is about to happen, but it's already happening, as evidenced by retrospective studies of climate on agricultural-areas of the country made by Ruiz *et al.* (2000); Zarazúa *et al.* (2011); Medina *et al.* (2011).

Simultaneously, a steadily increase of average temperature through the studied decades (Table 2), will impact the day and nighttime temperature. In the case of the subtropical zone, the average daytime temperature will change from 24.6 °C in 1961-2003, to 26.4 °C in the 2051-2060 decade; while in the high valleys it would increase from 20 to 21.9 °C (Table 3); the average daytime temperature obtained in both agricultural-areas would be close to the optimum

sitios de evaluación como de germoplasma, para formar variedades mejoradas de maíz exitosas en escenarios de cambio climático.

Sin embargo, los tiempos para iniciar la investigación en mejoramiento genético de maíz con este enfoque debe ser inmediato, debido que el cambio climático no es un fenómeno que está próximo a suceder, sino que ya se está inmerso en él; tal como lo demuestran los estudios de análisis retrospectivo del clima en áreas agrícolas del país realizados por Ruiz *et al.* (2000); Zarazúa (2011); Medina *et al.* (2011).

De manera paralela, un incremento de la temperatura media de manera sostenida a través de las décadas estudiadas (Cuadro 2), tendrá impacto en la temperatura diurna y nocturna. En el caso de la zona subtropical la temperatura diurna promedio pasaría de 24.6 °C en 1961-2003, a 26.4 °C en la década de 2051-2060; mientras que en la región valles altos pasaría de 20 a 21.9 °C (Cuadro 3); la temperatura diurna promedio obtenida en ambas zonas agrícolas, se aproximaría a la temperatura óptima requerida para la fotosíntesis del maíz; la cual se ubica entre 25 y 35 °C (Duncan, 1975; Benacchio, 1982; Kim *et al.*, 2007).

temperature required for maize photosynthesis, which is between 25 and 35 °C (Duncan, 1975; Benacchio, 1982; Kim *et al.* 2007).

In the case of the night temperature increase, this could favor the high valleys area, where the May-October average in 1961-2003 was 13.2 °C, just above the lower limit of 13 °C suggested by Shaw (1977) for maize planted in the temperate zones; in the next decades the night temperature will gradually increase until reaching 15.1 °C in 2051-2060. For the subtropical zone, the average nighttime temperature will increase from 17.8 (1961-2003) to 19.8 °C (2051-2060) (Table 3), which would exceed the appropriate range of night temperatures, 15.5 to 18.3 °C for maintaining low levels of nocturnal respiration and high grain yields (Thomison, 2010; GLH, 2010).

Regarding to the agricultural areas of the tropics, very high valleys and transitional; for the tropic were obtained high night temperatures values in 1961-2003, as in the four studied decades of the XXI century, even above the ideal range for high yields in maize (Table 3); which explains why the tropics have never been considered one of the best areas for maize production.

Cuadro 3. Valores de temperatura diurna y nocturna en el ciclo mayo-octubre de las áreas agrícolas en cinco estratos altitudinales, bajo cuatro climatologías en el escenario de emisiones A2.

Table 3. Temperature values in the day and night from May to October cycle of agricultural areas into five altitude layers, under four climatologies in the A2 emissions scenario.

Periodo	Temperatura (°C)	Zona ecológica				
		Trópico	Subtrópico	Transición	Valles altos	Valles muy altos
1961-2003	Temperatura diurna	29.9	24.6	22.6	20	17.7
2011-2020	Temperatura diurna	30.7	25.3	23.3	20.8	18.4
2031-2040	Temperatura diurna	31	25.7	23.7	21.1	18.8
2051-2060	Temperatura diurna	31.7	26.4	24.4	21.9	19.6
1961-2003	Temperatura nocturna	23.7	17.8	15.2	13.2	11.1
2011-2020	Temperatura nocturna	24.5	18.5	16.1	14	11.8
2031-2040	Temperatura nocturna	25	18.9	16.5	14.5	12.2
2051-2060	Temperatura nocturna	25.7	19.8	17.4	15.1	12.8

En el caso del incremento de la temperatura nocturna, éste podría favorecer a la zona de valles altos, donde el promedio mayo-octubre en 1961-2003 fue de 13.2 °C, apenas arriba del límite inferior de 13°C sugerido por

In the very high valleys area, even with the expected temperature increase for the 2051-2060 decade, there will not be values above the minimum night temperature of 13 °C recommended for maize; so in the next five decades, this area

Shaw (1977) para el maíz que se siembra en las zonas templadas; durante las próximas décadas la temperatura nocturna aumentará paulatinamente hasta alcanzar en 2051-2060 los 15.1 °C. Para la zona del subtrópico, la temperatura nocturna media se incrementaría de 17.8 (1961-2003) a 19.8 °C (2051-2060) (Cuadro 3); la cual superaría el rango adecuado de temperatura nocturna, 15.5 a 18.3 °C, para mantener niveles bajos de respiración nocturna y altos rendimientos de grano (Thomison, 2010; GLH, 2010).

Con relación a las zonas agrícolas del trópico, valles muy altos y transición, en el trópico se obtuvieron valores altos de temperatura nocturna tanto en 1961-2003, como en las cuatro décadas del siglo XXI estudiadas, muy por arriba incluso del rango ideal para obtener altos rendimientos en maíz (Cuadro 3); lo cual explica porque la zona tropical nunca se ha considerado como una de las mejores para la producción de maíz.

En la zona de valles muy altos, aun con el incremento de temperatura esperado para la década 2051-2060, no se tendrán valores de temperatura nocturna superiores al mínimo de 13 °C recomendado para maíz; por lo que, en las próximas cinco décadas, esta zona no tendría cambios sustanciales en el potencial productivo de maíz y los incrementos en rendimiento de grano estarían asociados a un mejoramiento de la tecnología de producción actual; así como del germoplasma regional y exótico-adaptado para formar variedades mejoradas. En cambio en la zona de transición se tendrían condiciones de temperatura nocturna muy favorables, para la obtención de altos rendimientos de maíz; ya que ésta se incrementaría de 15.2 a 17.4 °C, y la temperatura diurna esperada de 24.4 °C en la década de 2051-2060, estaría muy cercana al óptimo de 25 a 35 °C (Cuadro 3).

En el análisis del balance hídrico para el ciclo mayo-octubre y los periodos de 1961-2003 a 2051-2060, se encontró que la precipitación (P) disminuirá 4.4, 3.8, 4.1, 4.5 y 4.4% en las zonas trópico, subtrópico, transición, valles altos y valles muy altos. Asimismo, para los mismos periodos y zonas agrícolas, la evapotranspiración (ETP) se incrementará en 5.5, 5.9, 6.1, 6.8, y 7.5%. Esta combinación traerá una disminución paulatina del índice de humedad (P/ETP) en cada una de estas regiones, que pasará de 1.3 a 1.1 en el trópico, 1 a 0.9 en el subtrópico, 0.8 a 0.7 en transición, 1 a 0.9 en valles altos y 1.3 a 1.1 en valles muy altos (Cuadro 4).

would not have substantial changes in the maize productive potential and, grain yield increases will be related to the improvement of current production technology; as well as with regional and exotic-adapted germplasm to form improved varieties. In contrast, in the transition zone there would be very favorable nighttime temperature conditions to obtaining high maize yields; as it would increase from 15.2 to 17.4 °C and, expected daytime temperature of 24.4 °C in 2051-2060 decade, would be very close to the optimum of 25 to 35 °C (Table 3).

In the analysis of water balance from May to October and periods of 1961-2003 to 2051-2060, it was found that, the precipitation (P) will decrease 4.4, 3.8, 4.1, 4.5 and 4.4% in tropical zones, subtropical, transition, high valleys and very high valleys as well. Also, for the very same periods and agricultural areas, evapotranspiration (ETP) will increase by 5.5, 5.9, 6.1, 6.8, and 7.5%. This combination will cause a gradual decrease of moisture content (P/ETP) in each of these regions, increasing from 1.3 to 1.1 in the tropics, 1 to 0.9 in the subtropics, 0.8 to 0.7 in transition, 1 to 0.9 in high valleys and 1.3 to 1.1 in very high valleys (Table 4).

In this regard, the most affected maize agricultural-areas would be: subtropical, transition and high valleys, because in the tropics and very high valleys, rainfall would remain well enough to meet the water demand; these trends are consistent with future scenarios reported for various agricultural-areas (IPCC, 2007). However, it's important to note the convenience that these studies are complemented by a detailed agricultural water balance for knowing better the impact of climatic change on maize production.

Potential areas for maize

Based on the maize-production potential in Mexico and the climate change scenario of five agricultural-areas under study. In the surface estimates with marginal agro-climatic growing conditions, suboptimal and optimal, it was found that, the climatic change will have a negative impact on the maize production in Mexico, because there will be a gradual loss of agricultural land with optimal conditions for maize cultivation in the tropics zones, subtropics and transition (Table 5); in agricultural-areas of the tropics and subtropics it's mainly due to the temperature increase; while in the transition zone is mainly due to a negative water balance (Tables 2 and 3).

In contrast, the agricultural area with optimal conditions for maize will increase in the high valleys and very high valleys areas; but a water balance of the five agricultural

Cuadro 4. Valores promedio de precipitación, ETP e IH en el ciclo mayo-octubre de cinco áreas agrícolas productoras de maíz bajo cuatro climatologías y escenario de emisiones A2.

Table 4. Average values of rainfall, ETP and IH in the May-October cycle of five maize-producing agricultural areas under four climates and, A2 emissions scenario.

Periodo	Variable	Zona ecológica				
		Trópico	Subtrópico	Transición	Valles altos	Valles muy altos
1961-2003	Precipitación (mm)	948	752	603	680	774
2011-2020	Precipitación (mm)	905	725	581	652	745
2031-2040	Precipitación (mm)	912	727	584	657	752
2051-2060	Precipitación (mm)	906	723	578	649	740
1961-2003	ETP (mm)	757	779	781	673	601
2011-2020	ETP (mm)	776	805	808	697	624
2031-2040	ETP (mm)	768	801	804	694	622
2051-2060	ETP (mm)	799	825	829	719	646
1961-2003	Índice de humedad	1.3	1	0.8	1	1.3
2011-2020	Índice de humedad	1.2	0.9	0.7	0.9	1.2
2031-2040	Índice de humedad	1.2	0.9	0.7	0.9	1.2
2051-2060	Índice de humedad	1.1	0.9	0.7	0.9	1.1

En este sentido las zonas agrícolas maiceras más perjudicadas serían: subtrópico, transición y valles altos, debido que en el trópico y en valles muy altos la precipitación seguiría siendo suficiente para cubrir la demanda de agua; estas tendencias coinciden con los escenarios futuros informados para diversas zonas agrícolas del mundo (IPCC, 2007). Sin embargo, es importante señalar la conveniencia de que estos estudios se complementen con un balance hídrico agrícola detallado para dimensionar mejor el impacto del cambio climático en la producción de maíz.

Áreas potenciales para maíz

Con base en el potencial para producción de maíz en México y el escenario de cambio climático de las cinco zonas agrícolas estudiadas. En las estimaciones de la superficie con condiciones agroclimáticas marginales, subóptimas y óptimas, se encontró que el cambio climático tendrá un impacto negativo en la producción de maíz en México, debido que habrá una pérdida paulatina de la superficie agrícola con condiciones óptimas, para el cultivo del maíz en las zonas del trópico, subtrópico y transición (Cuadro 5); en las zonas agrícolas de trópico y subtrópico se debe fundamentalmente al incremento en temperatura; mientras que en la zona de transición a un balance hídrico negativo (Cuadros 2 y 3).

areas, results negative for the country, as there will be more hectares lost that gained. In this regard, the loss of potential areas for maize in Jalisco had been reported for the period 1972-1996 by Ruiz *et al.* (2000), who explained that, the loss by the reduction of growing season, by increasing temperature and, decreased rainfall in the summer. The increase in the optimal surface for maize in high valleys and very high valleys may also have an increase in the economic yield of maize, as mentioned by Conde (2006), for the State of Tlaxcala, who noted that, for 2050, an increase of 22% is expected in maize yields due to increased CO₂ and temperature and, a reduction of the frost-free period.

The Figures 1 and 2 show only the spatial distribution of maize potential areas in 1961-2003 and 2051-2060 climates corresponding to the subtropical and high valleys areas, which are currently considered as the most important of rainfed maize production in Mexico. Comparing the 1961-2003 and 2051-2060 scenarios, in the subtropical zone, it shows that, in 2051-2060 there will be a reduction in optimal areas for maize in the States of Jalisco, Michoacán, Morelos, Puebla and Chiapas. It is also important to note that most of the surface that is lost with optimal conditions for maize, will become suboptimal surfaces, it means that, in the current maize-producing areas of Mexico, there will be production cuts in the coming decades (Table 5, Figure 1); in terms of marginal areas, they will only increase in 3.8%.

Cuadro 5. Superficie potencial (ha) para maíz con condiciones agroclimáticas marginales, subóptimas y óptimas en cinco zonas agrícolas, con cuatro escenarios climáticos.

Table 5. Potential area (ha) for maize growing with marginal conditions, suboptimal and optimal in five agricultural zones, with four climate scenarios.

Escenario climático	Condición agroclimática	Zona ecológica				
		Trópico	Subtrópico	Transición	Valles altos	Valles muy altos
1961-2003	Marginal	5 109 493	2 349 638	2 363 146	735 260	242 077
	Subóptima	9 619 473	3 258 889	2 605 822	2 169 459	510 332
	Óptima	67 512	674 665	239 491	38 031	97
2011-2020	Marginal	5 277 354	2 431 785	2 630 566	823 699	242 342
	Subóptima	9 474 978	3 337 608	2 378 665	2 082 750	510 002
	Óptima	44 145	513 799	199 228	36 301	162
2031-2040	Marginal	5 538 511	2 431 270	2 585 539	807 039	242 184
	Subóptima	9 237 421	3 404 038	2 414 535	2 085 756	509 824
	Óptima	20 545	447 885	208 384	49 954	499
2051-2060	Marginal	7 522 489	2 440 624	2 719 047	843 064	242 261
	Subóptima	7 260 778	3 475 545	2 307 982	2 033 016	507 196
	Óptima	13 209	367 024	181 430	66 669	3 049

En contraparte, la superficie agrícola con condiciones óptimas para maíz se incrementará en las zonas valles altos y valles muy altos; pero al hacer un balance en las cinco zonas agrícolas, éste resulta negativo para el país; ya que serán más las hectáreas que se perderán que las que se ganarán. En este sentido, la pérdida de áreas potenciales para maíz en el estado de Jalisco ya había sido reportada para el periodo 1972-1996 por Ruiz *et al.* (2000), quienes explicaron dicha pérdida mediante la reducción de la estación de crecimiento, por incremento de la temperatura y disminución de la lluvia en el verano. En contraste, el incremento de la superficie óptima para maíz en valles altos y valles muy altos, también pueden tener un aumento en el rendimiento económico del maíz; tal como menciona Conde (2006) para el estado de Tlaxcala, quien señala que en el año 2050 se espera un incremento de 22% en el rendimiento del maíz, debido al incremento de temperatura y CO₂, y una reducción del periodo libre de heladas.

En la Figuras 1 y 2 se presenta sólo la distribución espacial de las áreas potenciales de maíz en las climatologías 1961-2003 y 2051-2060, correspondientes a las zonas subtropical y valles altos, las cuales son consideradas en la actualidad como las más importantes en producción de maíz de temporal en México. Al comparar los escenarios 1961-2003 y 2051-2060 en la zona subtropical, se aprecia que en 2051-2060, habrá reducción de las áreas óptimas para maíz en los estados de Jalisco, Michoacán, Morelos, Puebla y Chiapas. Asimismo, es importante destacar, que la mayor parte de la superficie que se pierde con condiciones óptimas para maíz, se convierte en superficie

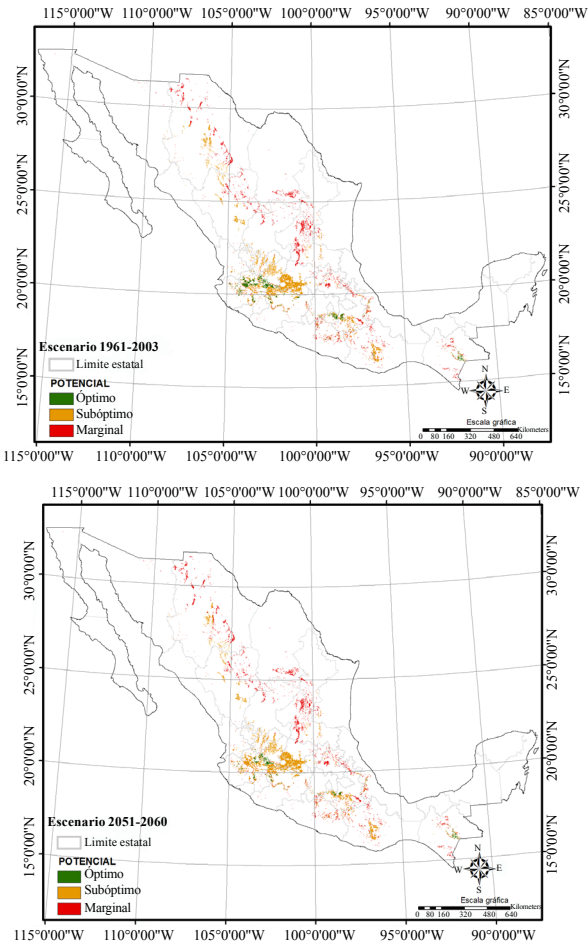


Figura 1. Áreas potenciales para maíz en la región subtropical, climatologías 1961-2003 y 2051-2060.
Figure 1. Potential areas for maize in the subtropical region, 1961-2003 and 2051-2060 climates.

con condiciones subóptimas, significa que en las actuales zonas productoras de maíz en México, habrá reducciones de producción en las próximas décadas (Cuadro 5, Figura 1); en cuanto a las áreas marginales, éstas se incrementarán sólo en 3.8%.

La Figura 2 muestra la comparación de áreas potenciales en la región valles altos. Ahí puede verse que el incremento de áreas con condiciones óptimas para maíz en esta zona tendrá lugar fundamentalmente en el Estado de México, en la región fronteriza con los estados de Morelos, Puebla y Distrito Federal.

Hasta aquí los estudios de temperatura, precipitación y potencial productivo, indican como efecto el cambio climático en las próximas décadas se tendrá reducción en la producción de maíz en México. Por lo tanto, los resultados aquí presentados deberán tomarse como parte del marco de referencia físico, para retroalimentar a investigadores y tomadores de decisiones, para iniciar en México un programa de investigación formal y de largo plazo, que involucre estrategias de producción de maíz con el enfoque de cambio climático; ya que las aplicadas hasta hoy se involucran poco con la selección de germoplasma enfocada a adaptación a tensiones ambientales (sequía y altas temperaturas), eficiencia en la producción de materia seca, y resistencia a plagas y enfermedades, aspectos que serán fundamentales para librar con éxito las nuevas condiciones climáticas durante el presente siglo.

CONCLUSIONES

La temperatura del periodo mayo-octubre se incrementará sostenidamente durante las próximas cinco décadas del siglo XXI, en las cinco zonas productoras de maíz estudiadas, hasta alcanzar un calentamiento aproximado de 2 °C en la década de 2051-2060.

Como efecto del incremento de temperatura habrá mayor acumulación de grados-día de desarrollo, incremento en temperaturas diurna y nocturna, y evapotranspiración potencial en las cinco zonas productoras de maíz; lo que reducirá el ciclo de madurez y el potencial de rendimiento del maíz, especialmente en las zonas tropical y subtropical.

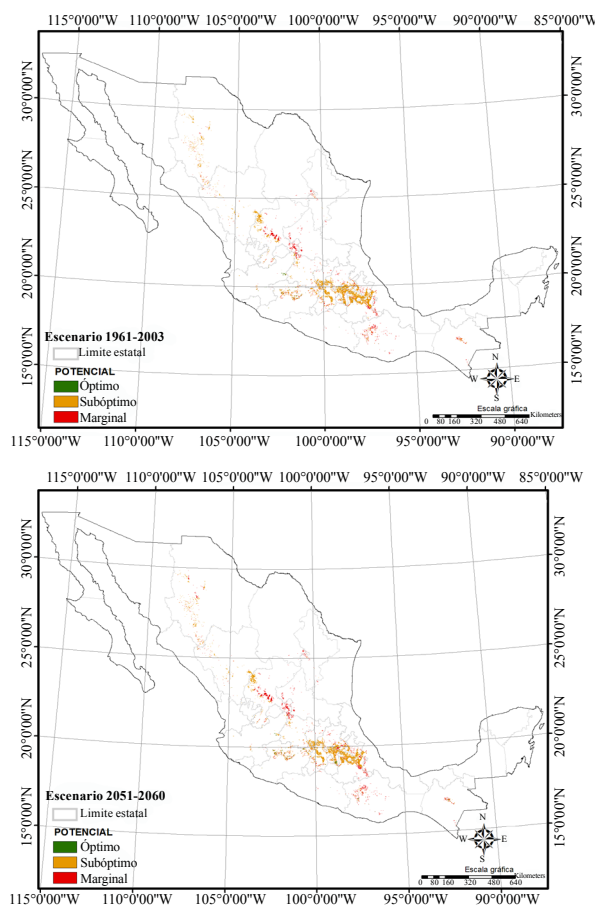


Figura 2. Áreas potenciales para maíz en la región valles altos, climatologías 1961-2003 y 2051-2060.

Figure 2. Potential areas for maize in the high valleys region, 1961-2003 and 2051-2060 climates.

The Figure 2 shows the comparison of potential areas of the high valleys region. It is observed that, the increase in areas with optimal conditions for maize in this area will take place mainly in the State of Mexico, along the border with the States of Morelos, Puebla and Mexico City.

So far, the studies of temperature, precipitation and productive potential indicate as an effect of climatic change in the coming decades, a reduction in maize production in Mexico. Therefore, the results presented here should be taken as part of the physical framework for feedback researchers and decision makers, in order to begin in Mexico a formal long term research program that, would involve strategies for maize production with a climatic change approach; since those applied today are not that involved in germplasm selection, focused

La precipitación acumulada promedio del período mayo-octubre disminuirá alrededor de 4% en todas las zonas productoras de maíz. La combinación de mayor evapotranspiración potencial y menor precipitación dará como resultado un balance hídrico menos favorable, con efectos negativos sobre el rendimiento en las zonas subtropical, transición y valles altos.

La superficie con condiciones agroclimáticas óptimas para producir maíz disminuirá en el trópico por incremento de la temperatura, en el subtrópico por incremento de la temperatura y disminución de la precipitación, y en transición por reducción de la precipitación; y se incrementará en valles altos y valles muy altos, debido al aumento de la temperatura nocturna y a un balance hídrico positivo; a pesar de la reducción en la precipitación.

AGRADECIMIENTOS

Al Instituto Nacional de Ecología (INE) e Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP); por el apoyo financiero y las facilidades brindadas en la realización de esta investigación, dentro del marco de los proyectos “PRECI 3057110AF: evaluación de la vulnerabilidad y propuesta de medidas de adaptación a nivel regional de algunos cultivos básicos y frutales ante escenarios de cambio climático”, y “PRECI 1527703M: cambio climático y su impacto sobre el potencial productivo agrícola, forrajero y forestal en México”.

LITERATURA CITADA

- Benacchio, S. S. 1982. Algunas exigencias agroecológicas en 58 especies de cultivo con potencial de producción en el Trópico Americano. FONAIAP-Centro Nacional de Investigaciones Agropecuarias. Ministerio de Agricultura y Cría. Maracay, Venezuela. 202 p.
- Conde, C.; Ferrer, R. and Orozco, S. 2006. Climate change and climate variability impacts on rainfed agricultural activities and possible adaptation measures. A Mexican case study. *Atmósfera*. 19:181-194.

on adaptation to environmental stresses (drought and high temperatures), efficiency in dry matter production and, resistance to pests and diseases too, which will be fundamental aspects to successfully deliver the new climatic conditions during this century.

CONCLUSIONS

The temperature of the May-October period will steadily increase over the next five decades of the XXI century, in the five maize producing areas under study, until reaching a warming of about 2 °C in the 2051-2060 decade.

As an effect of the temperature increasing, there will be a greater accumulation of degree-days of development, increased daytime and nighttime temperatures and potential evapotranspiration in the five maize-producing areas as well, thus reducing the maturity cycle and, maize yield potential, especially in the tropical and subtropical zones.

The average cumulative rainfall from the May to October period will decrease about 4% in all maize growing areas. The combination of increased potential evapotranspiration and, reduced precipitation will result in a less favorable water balance, with negative effects on yield in the subtropical, transitional and, high valleys zones.

The surface with optimal growing conditions for the maize-production will decrease in tropical zones due to the temperature increasing, in the subtropics by the increased temperature and decreased precipitation and, in the transitional due to the precipitation reduction and it will increase in high valleys and very high valleys due to the increase in nighttime temperature and, a positive water balance; despite the precipitation reduction.

End of the English version



- Duncan, W. G. 1975. Maize. *In: crop physiology. Some case histories.* (Evans, L.T. Editor). Cambridge University Press. Cambridge, London, England. 23-50 pp.

- Gay, C.; Estrada, F.; Conde, C. y Eakin, H. 2004. Impactos potenciales del cambio climático en la agricultura: escenarios de producción de café para el 2050 en Veracruz (México). *In: el clima entre el mar y la montaña*. García, C. J. C.; Liaño, C. D.; P. Fernández de Arróyabe, H. C.; Garmendia, P. y Rasilla, A. D. (eds.). Asoc. Esp. Climatol. y Univ. de Cantabria. Serie A. Núm. 4.
- GLH. 2010. Excessive heat and humidity hot ideal for corn. URL: <http://www.greatlakeshybrids.com/posts/4315-excessive-heat-and-humidity-not-ideal-for-corn>.
- Hatfield, J. L.; Boote, K. J.; Kimball, B. A.; Ziska, L. H.; Izaurralde, R. C.; Ort, D.; Thomson, A. M. and Wolfe, D. 2011. Climate impacts on agriculture: Implications for crop production. *Agron. J.* 103:351-370.
- Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI). 2009. Guía para interpretación cartográfica: Uso de suelo-vegetación Serie III. D. F., México. 71 p.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2007. Climate change 2007: mitigation of climate change. Contribution of working group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Metz, B.; Davidson, O.; Bosch, P.; Dave, R. and Meyer, L. (eds.). Cambridge University Press, UK. and USA. 851 p.
- Izaurralde, R. C.; Thomson, A. M.; Morgan, J. A.; Fay, P. A.; Polley, H. W., and Hatfield, J. L. 2011. Climate impacts on agriculture: implications for forage and rangeland production. *Agron. J.* 103:371-381.
- Kim, S. H.; Gitz, D. C.; Sicher, R. C.; Timlin, D. J.; Reddy, V. R. 2007. Temperature dependence of growth, development, and photosynthesis in maize under elevated CO₂. *Environ. Exp. Bot.* 61:224-236.
- Kimball, B. A.; Kobayashi, K.; and Bindi, M. 2002. Responses of agricultural crops to free-air CO₂ enrichment. *Adv. Agron.* 77:293-368.
- Kimball, B. A. 2007. Global change and water resources. *In: Lascano, R. J. and Sojka, R. E. (ed.). Irrigation of agricultural crops. 2nd edition*. ASA, CSSA and SSSA. Madison, WI. *Agron. Monogr.* 30: 627-654.
- Leakey, A. D. B.; Uribeblarra, M.; Ainsworth, E. A.; Naidu, S. L.; Rogers, A.; Ort, D. R. and Long, S. P. 2006. Photosynthesis, productivity and yield of maize are not affected by open-air elevation of CO₂ concentration in the absence of drought. *Plant Physiol.* 140:779-790.
- Magaña, V. y Caetano, E. 2007. Pronóstico climático estacional regionalizado para la república mexicana como elemento para la reducción de riesgo, para la identificación de opciones de adaptación al cambio climático y para la alimentación del sistema: cambio climático por Estado y por Sector. Informe Final de Proyecto de Investigación. Centro de Ciencias de la Atmósfera-UNAM-Instituto Nacional de Ecología (INE). Documento no publicado. D. F., Mexico. 41 p.
- Maroco, J. P.; Edwards, G. E.; and Ku, M. S. B. 1999. Photosynthetic acclimation of maize to growth under elevated levels of carbon dioxide. *Planta.* 210:115-125.
- Organización para las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO). 2007. Adaptation to climate change in agriculture, forestry and fisheries: perspective framework and priorities. FAO Interdepartmental Working Group on Climate Change. Rome, Italy. 24 p.
- Ojeda, B. W.; Sifuentes, I. E.; Íñiguez, C. M. y Montero, M. M. J. 2011. Impacto del cambio climático en el desarrollo y requerimientos hídricos de los cultivos. *Agrociencia.* 45:1-11.
- Ramírez, D. J. L.; Ron, P. J.; Maya, L. J. B. y Cota, A. O. 1995. H-357 y H-358. Híbridos de maíz de cruza simple para la zona subtropical y tropical de México. Campo Experimental Centro de Jalisco. CIPAC- INIFAP. Tlajomulco, Jalisco, México. Folleto Técnico. Núm. 4. 20 p.
- Ruiz, C. J. A.; Ramírez, D. J. L.; Flores, M. F. J y Sánchez, G. J. J. 2000. Cambio climático y efectos sobre las áreas potenciales para maíz en Jalisco, México. *Rev. Fitotec. Mex.* 23:183-194.
- Ruiz, C. J. A.; Flores, L. H. E.; Ramírez, D. J. L. y González, E. D. R. 2002. Temperaturas cardinales y duración del ciclo de madurez del híbrido de maíz H-311 en condiciones de temporal. *Agrociencia.* 36(5):569-577.
- Ruiz, C. J. A.; González, A. I. J.; Anguiano, C. J.; Vizcaíno, V. I.; Ibarra, C. D.; Alcalá, G. J.; Espinoza, V. S. y Flores, L. H. E. 2003. Estadísticas climatológicas básicas para el estado de Jalisco (1961-2000). INIFAP-Campo Experimental Centro de Jalisco. Tlajomulco, Jalisco. Libro técnico. Núm. 1. 281 p.

- Ruiz, C. J. A.; Medina, G. G.; Manríquez, O. J. D. y Ramírez, D. J. L. 2010. Evaluación de la vulnerabilidad y propuestas de medidas de adaptación a nivel regional de algunos cultivos básicos y frutales ante escenarios de cambio climático. INIFAP-INE. Guadalajara, Jalisco, México. 108 p.
- Shaw, R. H. 1975. Growing degree units for corn in the North Central Region. North Central Regional Iowa State University IWRBBR. Research Publication Num. 229. 581:793-808.
- Shaw, R. H. 1977. Climatic requirement. *In*: corn and corn improvement. Sprague, G. F. (ed.). American Society of Agronomy, Inc., Publisher. Num. 18. Madison, Wisconsin, USA. Agronomy Series. 591-623 pp.
- Sistema de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). 2010. Información del sector agroalimentario 2010: maíz. Sistema de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). SAGARPA. 2^{da} edición, 2010. D. F., México. 62-63 pp.
- Sivakumar, M. V. K.; Das, H. P. and Brunini, O. 2005. Impacts of present and future climate variability and change on agriculture and forestry in the arid and semi-arid tropics. *In*: increasing climate variability and change. Salinger, J. M. Sivakumar, V. K. and Motha, R. P. (eds.). Springer, USA. 31-72 pp.
- Thomison, P. 2010. Impact of warm night temperatures on corn grain yields. Crop Observation and Recommendation Network (CORN). Newsletter 201004.
- Tubiello, F. N.; Donatelli, M.; Rosenzweig, C. and Stockle, C. O. 2000. Effects of climate change and elevated CO₂ on cropping systems: model predictions at two Italian locations. *European J. Agron.* 13(2-3):179-189.
- Tubiello, F. N.; Soussana, J. F. and Howden, S. M. 2007. Crop and pasture response to climate change. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA.* 104:19686-19690.
- Zarazúa, V. P. 2011. Evaluación del cambio climático y sus impactos sobre los cultivos de trigo, maíz y agave de la Región Ciénega de Chapala (análisis retrospectivo y análisis prospectivo). Tesis doctoral. Universidad de Guadalajara-CUCBA. Zapopan, Jalisco, México. 188 p.