

## Proyecciones de cambio climático y potencial productivo para *Salvia hispanica* L. en las zonas agrícolas de México\*

### Projections of climate change and productive potential for *Salvia hispanica* L. in agricultural areas of Mexico

Guillermo Orozco de Rosas<sup>1</sup>, Noé Durán Puga<sup>2§</sup>, Diego Raymundo González Eguiarte<sup>3</sup>, Patricia Zarazúa Villaseñor<sup>3</sup>, Gabriela Ramírez Ojeda<sup>4</sup> y Salvador Mena Munguía<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Chíablanca, S. C. de R. L. La paz 54, Acatic, Jalisco, México. C. P. 45470. (chiablanca@yahoo.com.mx). <sup>2</sup>Unidad Académica de Agricultura. Universidad Autónoma de Nayarit. Carretera Tepic-Compostela, km 9. Xalisco, Nayarit, México. C. P. 63780. <sup>3</sup>Centro Universitario de Ciencias Biológicas y Agropecuarias. Universidad de Guadalajara. Carretera Guadalajara-Nogales, km 15.5. (diegonz@cucba.udg.mx; pzarazua@cucba.udg.mx). <sup>4</sup>Campo Experimental Centro-Altos de Jalisco. INIFAP. Carretera libre Tepatitlán-Lagos de Moreno, km 8. Tepatitlán, Jalisco, México. C. P. 47600. (ramirez.gabriela@inifap.gob.mx). <sup>§</sup>Autor para correspondencia: noeduranpuga@yahoo.com.mx.

#### Resumen

El objetivo del presente estudio fue estimar el impacto del cambio climático para el período 2040-2069, en las áreas potenciales para la producción de *S. hispanica* L., en tres estratos altitudinales en las áreas agrícolas de México: 0-1 200 msnm (tierras bajas), 1 200-2 200 msnm (tierras de altitud media) y >2 200 msnm (tierras altas). Se utilizaron variables topográficas, de suelo y clima para representar las áreas potenciales. Los datos climáticos correspondientes a los periodos 1961-1990 (climatología de referencia) y 2040-2069, se obtuvieron del portal de WorldClim Earth System Grid y se trabajó a 2.5 min de resolución con imágenes tipo raster con el software Idrisi Selva. Para el escenario 2040-2069, se consideraron tres Modelos de Circulación General (MCG): ECHAM5, MIROC (Medres) y UKMO\_HADCM3, bajo el escenario de emisiones de gases de efecto invernadero A2. Los resultados mostraron que con los cambios climáticos esperados la superficie óptima para *S. hispanica* L., se incrementará en tierras altas entre 1 432 y 1 733%, en tierras de altitud intermedia a una tasa de 43 a 58%, y disminuirá de 84 a 73% en tierras bajas. En lo referente a la superficie subóptima se pronostica una disminución en tierras de altitud intermedia a razón de 14 a 21% y un incremento de 60 a 85% en tierras bajas y de 101 a 126% en tierras altas.

#### Abstract

The aim of this study was to estimate the impact of climate change for the period 2040-2069, in the potential areas for the production of *S. hispanica* L., in three altitudinal strata in agricultural areas of Mexico: 0-1 200 m (lowland), 1 200-2 200 m (average elevation lands) and >2 200 m (highlands). Topographic variables, soil and climate were used to represent potential areas. Data for the period 1961-1990 (climatology of reference) and from 2040 to 2069, climatic data were obtained from the portal WorldClim Earth System Grid and worked with 2.5 min resolution with raster images with Idrisi Selva software. For the 2040-2069, three General Circulation Models (GCM) were considered: ECHAM5, MIROC (Medres) and UKMO\_HADCM3, under the emission scenario of greenhouse gases A2. The results showed that, with the expected climatic changes the optimum surface for *S. hispanica* L., will increase in the highlands between 1 432 and 1 733%, in intermediate elevation lands at a rate of 43-58% and will decrease from 84 to 73% in the lowlands. Regarding the suboptimal surface, a decreased in lands at intermediate elevation is forecast, at the rate of 14-21% and an increase of 60-85% in the lowlands and from 101 to 126% in the highlands.

\* Recibido: febrero de 2014  
Aceptado: agosto de 2014

**Palabras clave:** *Salvia hispanica* L., cambio climático, cambio climático y zonas altitudinales.

**Keywords:** *Salvia hispanica* L., climate change, climate change and elevation zones.

## Introducción

*Salvia hispanica*, es una planta anual originaria de las zonas montañosas del oeste y centro de México (Hernández *et al.*, 2008; Di Sapio *et al.*, 2012). Se encuentra naturalmente en áreas de bosques de encino o de pino-encino y se distribuye en ambientes semicálidos y templados del Eje Neovolcánico Transversal de las Sierras Madre Occidental y del sur de Chiapas, en altitudes que oscilan entre 1 400 y 2 200 m. Históricamente, esta especie se ha cultivado, tanto en ambientes tropicales como subtropicales, en áreas libres de heladas y en regiones con heladas anuales, desde el nivel del mar hasta 2 500 m (Capitani, 2013).

Actualmente numerosos estudios refieren que las semillas de chía se han revalorizado como insumos en la alimentación humana por su elevado contenido en ácido  $\alpha$ -linolénico, así como por el beneficio que implica para la salud el consumo del ácido graso  $\omega$ -3 que contiene (Di Sapio *et al.*, 2012). *S. hispanica* también puede aprovecharse en forma integral, ya que se ha demostrado la calidad en la composición de su semilla considerando fibra y proteínas (Vázquez *et al.*, 2009) y sus componentes de mucílago (Ramírez *et al.*, 2012).

El incremento en la demanda internacional en el mercado con un mejoramiento de los precios y la poca disponibilidad de materia prima, plantea la necesidad de aumentar la superficie del cultivo por parte de productores, empresarios y organismos gubernamentales. Ante la relevancia que adquiere el cultivo de la chía, es necesario caracterizar el medio físico y los factores naturales del país, para localizar las áreas de cultivo más adecuadas actuales y futuras para su producción bajo condiciones de temporal (Ramírez *et al.*, 2012).

Por otra parte, como resultado del aumento de los gases de efecto invernadero (GEI) en la atmósfera, se tiene presente un incremento en la temperatura global (Trenberth *et al.*, 2007; IPCC, 2013), lo que propicia la desecación de muchas regiones a través del aumento de la evaporación (Woodhouse *et al.*, 2010), y a la vez se acelera el proceso de madurez de los cultivos; de esta manera se reduce la duración del área foliar y con ello el requerimiento hídrico total a la madurez del cultivo (Hatfield *et al.*, 2011; Ojeda *et al.*, 2011). Éstos cambios en los patrones climáticos, tendrán profundos efectos

## Introduction

*Salvia hispanica* is an annual plant native to the mountainous areas of western and central Mexico (Hernández *et al.*, 2008; Di Sapio *et al.*, 2012). It is found naturally in areas of oak forests or pine-oak and is available in semi-warm and temperate environments in the Neovolcanic Transversal Belt in the Sierras Madre Occidental and southern Chiapas, in elevations ranging from 1 400 to 2 200 m. Historically, this species has been cultivated in both tropical and subtropical environments, in frost-free areas and in regions with annual freezing, from sea level to 2 500 m (Capitani, 2013).

Currently numerous studies report that chia seeds have risen as inputs in food because of their high  $\alpha$ -linolenic acid content, as well as the benefit to health that involves the consumption of  $\omega$ -3 fatty acid (Di Sapio *et al.*, 2012). *S. hispanica* can also be used in an integrated manner, as it has been demonstrated its quality considering fiber and protein content in the seeds (Vázquez *et al.*, 2009) and mucilage components (Ramírez *et al.*, 2012).

The increase in international demand in the market with better prices and limited availability of raw materials, speculates the need to increase the area of cultivation made by farmers, businesspeople and government agencies. Given the importance that acquires growing chia, is necessary to characterize the physical environment and natural factors of the country to find the most suitable growing areas for current and future production under rainfed conditions (Ramírez *et al.*, 2012).

On the other hand, as a result of the increase in greenhouse gases (GHG) in the atmosphere, there is an increase in the global temperature as well (Trenberth *et al.*, 2007; IPCC, 2013), which facilitates the drying of many regions through increased evaporation (Woodhouse *et al.*, 2010), while the process of crop maturity is accelerated; This way the length of the leaf area is reduced and thus, the total water requirement of the crop to maturity is also diminished (Hatfield *et al.*, 2011; Ojeda *et al.*, 2011). These changes in weather patterns will have profound effects on the terrestrial plant growth and productivity in the near future

en el crecimiento de las plantas terrestres y productividad en el futuro próximo (Attipalli *et al.*, 2010), así, es trascendental delimitar la distribución geográfica potencial de las pérdidas del rendimiento de los cultivos y desarrollar estrategias para mitigarlos (Deryng *et al.*, 2011; Justin *et al.*, 2012).

Ante la relevancia que adquiere el cultivo de la chía, es necesario caracterizar el medio físico y las condiciones agroclimáticas del país, para localizar las áreas de cultivo más adecuadas para su producción bajo condiciones de temporal. La selección de especies con potencial agroecológico para una región implica ventajas en el manejo del cultivo, ya que producir una especie fuera de su ambiente óptimo encarece las tecnologías de producción, o bien simplemente reduce el rendimiento por la presencia de condiciones de estrés ambiental (Ruíz *et al.*, 1999). Las principales causas de estrés son las variaciones extremas de factores tales como altas o bajas temperaturas y sequía o exceso de humedad.

En México, existen estudios sobre cambio climático y su impacto en la producción de cultivos, pero no se ha analizado a detalle el efecto de este fenómeno sobre el cultivo de la chía en particular; por tal motivo, el objetivo del presente estudio fue determinar el impacto del cambio climático sobre las áreas agrícolas potenciales en tres estratos altitudinales en México.

## Materiales y métodos

El estudio se realizó en las zonas agrícolas de México, bajo los siguientes estratos altitudinales: zonas bajas (<1 200 msnm), zonas de altitud intermedia (1 200 a 2 200 msnm) y zonas altas (>2 200 msnm).

### Especie estudiada

*Salvia hispanica* L. (chía), especie que formó parte esencial de la cultura mesoamericana, con una amplia distribución geográfica y un alto valor como insumo en la alimentación humana.

Bases de datos y sistema de información geográfica. Se utilizaron los datos mensuales y anuales de precipitación, temperatura máxima, temperatura mínima y temperatura media de los periodos 1961-1990 (climatología de referencia) y 2040-2069, para determinar las áreas potenciales de *S. hispanica*. Estos datos climáticos se obtuvieron del portal de datos de Earth System Grid (ESG) de WorldClim y se

(Attipalli *et al.*, 2010) and is crucial to delimit the potential geographical distribution of the losses of crop yields and develop strategies to mitigate them (Deryng *et al.*, 2011; Justin *et al.*, 2012).

Given the importance that acquires growing chia, is necessary to characterize the physical environment and agro-climatic conditions of the country, in order to locate the most suitable for production under rainfed conditions. The selection of species with potential for agro-ecological region implies advantages in crop management, since producing a species outside its optimal environment, makes quite expensive the production technologies, or simply reduces its yield due to the presence of environmental stress conditions (Ruíz *et al.*, 1999). The main causes of stress are extreme variations in factors such as high or low temperatures, drought or excess moisture.

In Mexico, there are studies on climate change and its impact on crop production, but it has not been analysed in detail the effect of this phenomenon on the cultivation of chia in particular; for this reason, the objective of this study was to determine the impact of climate change on potential agricultural areas in three altitudinal strata in Mexico.

## Materials and methods

The study was conducted in the agricultural areas of Mexico, under the following altitudinal strata: lowlands (<1 200 m), intermediate elevation areas (1 200 to 2 200 m) and highland areas (> 2 200 m).

### Species studied

*Salvia hispanica* L. (chia), a species that formed an essential part of the Mesoamerican culture, with a wide geographic distribution and a high value as input for human consumption.

Databases and GIS. We used the monthly and annual precipitation data, maximum, minimum and average temperature for the periods 1961-1990 (climatology of reference) and from 2040 to 2069, to determine potential areas of *S. hispanica*. These climate data were obtained from the data portal "Earth System Grid" (ESG) WorldClim and working through raster images with a resolution of 2.5 min

trabajaron mediante imágenes raster con una resolución de 2.5 min de arco, en el sistema Idrisi Selva (Eastman, 2012). Para el período 2040-2069 se consideraron los MCG: MPIM-ECHAM5, MIROC (medres) y UKMO\_HADCM3 bajo el escenario de emisiones de gases efecto invernadero A2 (IPCC, 2007).

Éstos tres modelos han sido de los más utilizados para México y han mostrado tener buen ajuste a las condiciones climáticas del país (Conde *et al.*, 2006). Para la determinación de áreas potenciales se incluyeron también otras variables de diagnóstico, tales como uso del suelo agrícola, pendiente y textura del suelo; las cuales se obtuvieron del sistema de información ambiental (SIAN) del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) (Díaz *et al.*, 2012); con excepción de uso de suelo agrícola y textura, la pendiente se extrajo de la imagen de uso de suelo serie III del Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI, 2009).

### Análisis estadístico

Se utilizó la prueba de Kolmogorov-Smirnov para probar normalidad en las series de datos de precipitación y temperatura (climatología 1961-1990) en las tres zonas altitudinales. La prueba se corrió a través del software SPSS Statistics 19 (IBM Corp, 2010). Dado que la prueba de normalidad reportó en todos los casos que los datos de temperatura y precipitación no tenían una distribución normal, se procedió a realizar un análisis de varianza con el estadístico no paramétrico de Kruskal y Wallis, el cual se conoce también como prueba H y utiliza rangos de datos muestrales de tres o más poblaciones independientes (Kruskal and Wallis, 1952). En el presente estudio la prueba H se utilizó para identificar diferencias significativas entre los datos de temperatura y precipitación de los tres estratos altitudinales. El estadístico se describe por la expresión:

$$H = \frac{12}{N(N+1)} \sum_{i=1}^j \frac{R_i^2}{n_i} - 3(N+1)$$

Donde:  $j$ = número de muestras;  $n_i$ = número de observaciones en la  $i$  muestra;  $N = \sum n_i$ , número de observaciones en todas las muestras combinadas;  $R_i$ = suma de los rangos en la  $i$  muestra.

Para realizar los análisis estadísticos se utilizaron los datos de temperatura y precipitación derivados de cada una de las celdas de las imágenes raster de estas variables para los

of arc it the Idrisi Selva system (Eastman, 2012). For the period 2040-2069 were considered the GCM: MPIM-ECHAM5, MIROC (medres) and UKMO\_HADCM3 under the emission scenario greenhouse gas A2 (IPCC, 2007).

These three models are the most used for Mexico and have shown good fit to the climatic conditions (Conde *et al.*, 2006). For determining the potential areas other diagnostic variables were also included, such as the use of agricultural land, land-slope and soil texture; which were obtained from the Environmental Information System (EIS) of the National Research Institute of Livestock, Agriculture and Forestry (INIFAP) (Díaz *et al.*, 2012); except for the agricultural land use and texture, land-slope was extracted from the image using soil series III of the National Institute of Statistics, Geography and Informatics (INEGI, 2009).

### Statistical analysis

The Kolmogorov-Smirnov test was used to test normality in the data series of precipitation and temperature (climatology 1961-1990) in the three altitudinal zones. The test was run through the SPSS Statistics 19 software (IBM Corp, 2010). Since the test of normality reported for all the cases that the data of temperature and precipitation were not normally distributed, we proceeded to analyse the variance with a nonparametric statistical method, proposed by Kruskal and Wallis, which is also known as test H and uses ranges sample data from three or more independent populations (Kruskal and Wallis, 1952). In the present study, the test H was used to identify significant differences between temperature and precipitation data from three altitudinal strata. Statistical described by the expression:

$$H = \frac{12}{N(N+1)} \sum_{i=1}^j \frac{R_i^2}{n_i} - 3(N+1)$$

Where:  $j$ = number of samples;  $n_i$ = number of observations in the sample  $i$ ;  $N = \sum n_i$ , number of observations in all the combined samples;  $R_i$ = sum of the ranks in the  $i$  sample.

In order to make the statistical analysis we used data of temperature and precipitation derived from each cell in the raster images of these variables for the three altitudinal strata studied. This information was obtained by transforming raster images to vector of points, which were exported in Idrisi Selva to ascii type file system and these were opened and manipulated in Microsoft Excel system.

tres estratos altitudinales estudiados. Esta información se obtuvo transformando las imágenes raster a vectores de puntos, los cuales se exportaron en el sistema Idrisi Selva a archivos tipo ascii y éstos se abrieron y manipularon en el sistema Excel de Microsoft.

### Diagnóstico de áreas potenciales

Las áreas potenciales se determinaron mediante un análisis multi-criterio en el sistema Idrisi-Selva y considerando un esquema cualitativo de tres categorías: áreas con condiciones agroecológicas óptimas (Op), áreas con condiciones agroecológicas subóptimas (Sp) y áreas con condiciones agroecológicas marginales (Mg). Se asumieron con condiciones agroecológicas óptimas, las áreas en las que todos los factores ambientales de análisis se encontraban en un nivel óptimo para las especies forrajeras; como subóptimas se clasificaron aquellas áreas en las que al menos una variable de diagnóstico se encontró en condiciones no óptimas (sub-óptimas o supra-óptimas) para el cultivo; por último se tomaron como marginales las áreas en las que al menos una de las variables de diagnóstico mantenía valores que restringían el desarrollo de las especies forrajeras estudiadas.

La información para establecer esta categorización se obtuvo de revisión bibliográfica reportada por Hernández y Miranda (2008); Jamboonsri *et al.* (2012); Capitani (2013). En el Cuadro 1 se describen los intervalos de tres variables utilizados para el diagnóstico de áreas potenciales. La pendiente del suelo para la especie se valoró asignando una condición óptima para pendientes de 0 a 8%, condición subóptima para pendientes de 8 a 20% y condición marginal para pendientes mayores a 20%. El análisis de áreas potenciales se realizó considerando como superficie de diagnóstico solamente las áreas de uso agrícola.

### Cuadro 1. Intervalos agroecológicos para el diagnóstico de áreas potenciales de *S. hispanica*.

Table 1. Agro-ecological intervals to diagnose potential areas of *S. hispanica*.

Temperatura media anual (°C)			Precipitación anual (mm)			Textura	
Op	Sp	Mg	Op	Sp	Mg	Op	Sp
18-26	15-18	0-15	750-1000	600-750	0-600	Fn, Md, Gr	Fn, Md, Gr
	26-33	>33		1000-1100	>1100		

Op= óptima; Sp= subóptima y supraóptima; Mg= marginal; Gr= gruesa; Md= media; Fn= fina.

### Diagnostic potential areas

Potential areas were determined using a multi-criteria analysis in the Idrisi-Selva system and considering a qualitative scheme of three categories: areas with optimal ecological conditions (Op), areas with suboptimal ecological conditions (Sp) and areas with marginal agro-ecological conditions (Mg). Established with optimal ecological conditions, the areas in which all the environmental factors analysis were at an optimum level for forage species; as suboptimal areas in which at least one variable of diagnosis was found in non-optimal conditions (sub-optimal or supra-optimal) for growing; finally taken as marginal areas where at least one of the diagnostic variables held values that restricted the development of forage species under study.

The information was obtained to establish categories of literature review reported by Hernández and Miranda (2008); Jamboonsri *et al.* (2012); Capitani (2013). The Table 1 shows the intervals of three variables used to diagnose potential areas. The slope of the ground for the species was assessed by assigning optimal condition for slopes 0-8%, suboptimal condition for slopes 8-20% and marginal condition for slopes larger than 20%. The analysis was performed considering potential areas as diagnostic only surface areas for agricultural use.

## Results and discussion

### Statistical analysis

As shown in Table 2, and according to the results of the Kolmogorov-Smirnov test ( $p < 0.0001$ ), the temperature and precipitation data have a normal distribution in any of the studied altitudinal strata.

## Resultados y discusión

### Análisis estadístico

Como se muestra en el Cuadro 2, y de acuerdo con los resultados de la prueba de Kolmogorov-Smirnov ( $p < 0.0001$ ), los datos de temperatura y precipitación no tienen una distribución normal en ninguno de los estratos altitudinales estudiados.

En el Cuadro 3 se describen los estadísticos básicos de temperatura y precipitación por estrato altitudinal. De acuerdo con los resultados de la prueba de Kruskal y Wallis, tanto la temperatura como la precipitación varían significativamente ( $p < 0.001$ ) entre los tres estratos altitudinales, por lo que las tres regiones topográficas pueden considerarse climáticamente diferentes entre sí.

### Cambios climáticos en las áreas agrícolas de México

La variación térmica que va de 14.3 °C en zonas altas a 22.8 °C en zonas bajas, en combinación con la variación de precipitación, produce gran diversidad ambiental en las zonas agrícolas de México. Las proyecciones de temperatura de los tres MCG señalan un incremento térmico en un rango de 2.6 a 2.9, 2.7 a 3.3 y 2.4 a 3.1 °C en zonas bajas, intermedias y altas, respectivamente (Cuadro 4) al pasar del período 1961-1990 al período 2040-2069, lo cual se traduce en un calentamiento por década de 0.32-0.37, 0.34-0.42 y 0.30-0.39 °C. Éste incremento se asemeja a lo consignado por Brohan *et al.* (2006) y Trenberth *et al.* (2007), quienes refieren que la temperatura de la atmósfera terrestre por decenio entre 1979 y 2005, aumentó  $0.268 \pm 0.069$  °C.

El calentamiento proyectado para la región de estudio es importante, ya que algunas áreas variarán su régimen de temperatura; como las zonas de altura intermedia que pasarán de una condición templada (12 a 18 °C de temperatura media anual, García, 1988) a una condición semicálida (18 a 22 °C, García, 1988; Medina *et al.*, 1998), lo cual tendrá efectos positivos sobre la superficie con condiciones óptimas para el cultivo de especies tropicales y subtropicales (Ruiz *et al.*, 2011). Sin embargo, el incremento de temperatura se considera nocivo para los patrones actuales de cultivo, ya que un aumento de la temperatura media estacional puede adelantar el tiempo de la cosecha de las variedades actuales, y por tanto reducir el rendimiento final; más aún si no se instrumentan medidas de adaptación (Gornall *et al.*, 2010).

### Cuadro 2. Resultados de la prueba de normalidad de Kolmogorov-Smirnov para datos de temperatura y precipitación de tres estratos altitudinales.

Table 2. Results of normality test Kolmogorov-Smirnov for temperature and precipitation data from three altitudinal strata.

Variable	GL	Estadístico de Kolmogorov-Smirnov	Probabilidad de significancia
Precipitación zona baja	53824	0.119	0.0001
Precipitación zona intermedia	35501	0.158	0.0001
Precipitación zona alta	9258	0.066	0.0001
Temperatura zona baja	53824	0.061	0.0001
Temperatura zona intermedia	35501	0.046	0.0001
Temperatura zona alta	9258	0.018	0.0001

The Table 3 shows the basic statistics of temperature and precipitation by altitudinal strata. According to the results of the Kruskal and Wallis method, both the temperature and precipitation vary significantly ( $p < 0.001$ ) between the three altitude layers, so that all three can be regarded topographical regions climatically different.

### Cuadro 3. Estadísticas básicas de temperatura y precipitación en tres estratos altitudinales.

Table 3. Basic statistics of temperature and precipitation in three altitudinal strata.

Variable	n	Media	Desviación estándar
Precipitación zona baja	53825	868	692.9
Precipitación zona intermedia	35502	609	382.4
Precipitación zona alta	9259	774.5	284.3
Temperatura zona baja	53825	22.8	2.74
Temperatura zona intermedia	35502	17.7	2.22
Temperatura zona alta	9259	14.3	2.09

**Cuadro 4. Valores promedio anuales de temperatura media y precipitación acumulada en dos escenarios climáticos para tres estratos altitudinales de la superficie agrícola.**

**Table 4. Average annual values of mean temperature and precipitation accumulated in two climate scenarios for three altitudinal strata of the agricultural area.**

Escenarios climáticos	Modelos	Variables	Estratos altitudinales		
			Zonas bajas	Zonas interm.	Zonas altas
1961-1990		Temperatura (°C)	22.8	17.7	14.3
		Precipitación (mm)	868	609	774
2040-2069	MPIM-ECHAM5	Temperatura (°C)	25.4	21	17
		Precipitación (mm)	874	622	756
	MIROC3.2 (medres)	Temperatura (°C)	25.7	20.5	17.4
		Precipitación (mm)	754	552	681
	UKMO_HadCM3	Temperatura (°C)	25.5	20.4	16.7
		Precipitación (mm)	819	633	815

En las zonas bajas, las cuales mantienen ya una temperatura cálida, cerca de los umbrales máximos fisiológicos de los cultivos, el incremento de temperatura proyectado en el presente estudio puede ser perjudicial, por el incremento de estrés por calor y la pérdida de agua por evaporación (Gornall *et al.*, 2010).

Con relación a la precipitación, las proyecciones de los tres MCG no mantienen una coincidencia tan alta como en el caso de la temperatura, ya que mientras los modelos MIROC (medres) y UKMO\_HADCM3 reflejan una disminución de la precipitación de 13 a 6%, en zonas bajas, el modelo MPIM-ECHAM5 proyecta un ligero incremento de 0.7% en la lluvia anual (Cuadro 4). En tanto, para las zonas intermedias se proyecta un incremento de la precipitación anual de 2 y 4%, con los modelos MPIM-ECHAM5 y UKMO\_HADCM3, respectivamente, y una disminución de 9.5% con el modelo MIROC (medres). En las zonas altas se vislumbra una disminución en la precipitación con los modelos MPIM-ECHAM5 y MIROC (medres) de 2 y 12%, y un aumento de 5% con el modelo UKMO\_HADCM3. Esta falta de consistencia en la modelación de la precipitación futura por parte de los diferentes MCG ya ha sido reportada previamente (IPCC, 2007) y se acentúa en zonas desérticas y semidesérticas Johnson y Sharma (2009), condición que predomina en el territorio mexicano. Este es un aspecto importante porque la precipitación es una variable relevante para las evaluaciones hidrometeorológicas y la productividad de los cultivos (Kumar *et al.*, 2004; Sivakumar *et al.*, 2005). Incluso los pequeños cambios en las precipitaciones pueden afectar la productividad (Lobell and Burke, 2008).

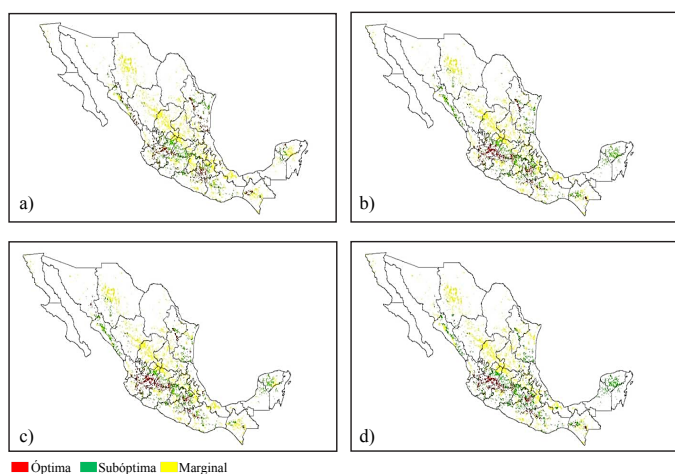
#### Climate changes in the agricultural areas of Mexico

The temperature variation ranging from 14.3 °C in the highlands to 22.8 °C in the lowlands, in combination with the variation of precipitation, produces great environmental diversity in agricultural areas of Mexico. Temperature projections of the three GCM show a heat increase in a range from 2.6 to 2.9, 2.7 to 3.3 and 2.4 to 3.1 °C at low, intermediate and high-lands, respectively (Table 4) passing the 1961-1990 period from 2040 to 2069 areas, which translates into a warming per decade of 0.32 to 0.37, 0.34 to 0.42 and 0.30 to 0.39 °C. This resembles the increase recorded by Brohan *et al.* (2006) and Trenberth *et al.* (2007), who reported that, the temperature of the Earth's atmosphere per decade between 1979 and 2005, increased about  $0.268 \pm 0.069$  °C.

The warming projected for the region of study is quite important, as some areas will vary its temperature regime; such as the areas of intermediate elevation which will change from a temperate condition (12-18 °C mean annual temperature, García, 1988) to a semi-warm conditions (18-22 °C, García, 1988; Medina *et al.*, 1998), which will have positive effects on the optimal conditions surface for the cultivation of tropical and subtropical species (Ruiz *et al.*, 2011). However, the temperature increase is considered harmful to current cropping patterns, since an increase in mean seasonal temperature can advance the time of harvest of the current varieties, and thus reducing the final yield; even if no adaptation measures are implemented (Gornall *et al.*, 2010).

## Áreas potenciales para *S. hispanica* en zonas agrícolas de México

Las condiciones óptimas para el cultivo de chía, se ubican, principalmente, en tierras bajas y de altitud intermedia durante el periodo de referencia (Figura 1), lo que demuestra que las condiciones climáticas de las zonas entre 0 y 2 200 msnm presentan mayores ventajas para los requerimientos agroclimáticos de la especie (Jamboonsri *et al.*, 2012; Capitani, 2013). Estas áreas se ubican, primordialmente, en los estados de Jalisco, Sinaloa, Nuevo León, Tamaulipas, Guerrero, Puebla, Oaxaca, Nayarit, Morelos, Veracruz, Michoacán, Yucatán y Chiapas.



**Figura 1.** Áreas potenciales para *Salvia hispanica*, bajo las climatologías: a) 1961-1990; b) 2040-2069 UKMO\_HadCM3; c) MPIM-ECHAM5; d) MIROC (medres) con escenario de gases efecto invernadero A2.

**Figure 1.** Potential areas for *Salvia hispanica* under climatologies: a) 1961-1990; b) 2040-2069 UKMO\_HadCM3; c) MPIM-ECHAM5; d) MIROC (medres) with scenario A2 greenhouse gases.

Por lo que estas regiones ofrecen una destacada oportunidad para mejorar la nutrición humana, dado que la chía proporciona una fuente natural de ácidos grasos omega-3, de antioxidantes y de fibra dietética; además de la capacidad de la semilla para enriquecer varios productos, añadiéndose directamente a los alimentos o formando parte de las dietas de los animales, proporciona una oportunidad para desarrollar productos con la semilla e incursionar en los mercados novedosos de productos funcionales o “nutracéuticos” (Hernández y Miranda, 2008).

In the lowlands, which already maintain a warm temperature, near the maximum physiological thresholds of the crops, the temperature increase projected in the present study might be harmful, due to the increasing of heat stress and water loss by evaporation (Gornall *et al.*, 2010).

Regarding precipitation, the projections of the three GCM do not maintained a coincidence as high as in the case of temperature, because while the MIROC (medres) and "UKMO\_HADCM3" models reflect a decrease in the precipitation of 13 to 6% in low areas, the model "MPIM-ECHAM5" projects a slight increase of 0.7% in annual rainfall (Table 4). Meanwhile, for the intermediate zones an increased is expected for the annual rainfall from 2 to 4%, with the models "MPIM-ECHAM5 and UKMO\_HADCM3" respectively, and a decrease of 9.5% with the model "MIROC" (medres) projects. In the highlands a decrease in precipitation is also expected using the models "MPIM-ECHAM5 and MIROC" (medres) of 2 and 12% and, a 5% increase with the model UKMO\_HADCM3. This lack of consistency in the modelling of future precipitation by the different GCM has been previously reported (IPCC, 2007) and is accentuated in desert and semi-desert areas (Johnson and Sharma, 2009), a condition that prevails in the Mexican territory. This is an important aspect because precipitation is a relevant variable for hydrometeorological assessments and crop productivity (Kumar *et al.*, 2004; Sivakumar *et al.*, 2005). Even small changes in precipitation can affect productivity (Lobell and Burke, 2008).

## Potential areas for *S. hispanica* in agricultural areas of Mexico

The optimum conditions for growing chia are located primarily in low and intermediate elevation lands during the reference period (Figure 1), demonstrating that, the climatic conditions of the areas between 0 and 2 200 m have better advantages for agro-climatic requirements of the species (Jamboonsri *et al.*, 2012; Capitani, 2013). These areas are located primarily in the States of Jalisco, Sinaloa, Nuevo León, Tamaulipas, Guerrero, Puebla, Oaxaca, Nayarit, Morelos, Veracruz, Michoacán, Yucatán and Chiapas.

For this reason, these regions offer an important opportunity for improving human nutrition since chia provides a natural source of omega-3 fatty acids, antioxidants and



En los mapas de la Figura 1, el efecto del cambio climático sobre las áreas potenciales de chíá también se puede observar. En este sentido, las predicciones de las áreas potenciales de los MCG, reflejan que la superficie óptima aumentará en tierras altas y de altitud intermedia, con respecto a la climatología de referencia, en los estados de Jalisco, Michoacán, Guerrero, Puebla, Morelos y Oaxaca; disminuirá en tierras bajas, principalmente en los estados de Sinaloa, Tamaulipas y Chiapas y desaparecerá en Yucatán.

Las predicciones climáticas de los tres MCG definieron áreas potenciales muy similares en la superficie óptima en los tres estratos altitudinales (Figura 1). Sin embargo, las áreas potenciales establecidas con el MCG: MIROC (medres) resultó sensiblemente diferente para tierras bajas con respecto a los otros dos escenarios. Éstos resultados son atribuibles, principalmente, a las diferencias en las simulaciones de precipitación de los MCG (Cuadro 4). Este hecho evidencia que las zonas potenciales del cultivo son sensibles a las variaciones climáticas de la simulación de los MCG, incluso entre los modelos que se consideran similares en la predicción del cambio climático para México (Conde *et al.*, 2006).

Una tendencia similar de los MCG, también se observó en la determinación de las superficies subóptimas. Se observa (Cuadro 5) que existe una tendencia a disminuir en tierras de altitud intermedia, principalmente en Jalisco; y a aumentar en zonas altas y zonas bajas, ubicadas en el Estado de México, Tlaxcala y Yucatán.

dietary fiber; and the ability of the seed to enrich several products being added directly to food or as part of the diets of animals, providing an opportunity to develop products with the seed and venture into novel functional product markets or "nutraceuticals" (Hernández and Miranda, 2008).

In the maps of Figure 1, the effect of climate change on potential areas of chia can also be observed. In this sense, the predictions of the potential areas of GCM show that, the optimal surface increase in highlands and intermediate elevation with respect to the climatology of reference, in the States of Jalisco, Michoacán, Guerrero, Puebla, Morelos and Oaxaca; decreasing in lowlands, mainly in the States of Sinaloa, Tamaulipas, Chiapas and disappearing in Yucatán.

The climate predictions of the three GCM defined potential areas very similar to the optimum surface in the three altitudinal strata (Figure 1). However, the potential areas established with the GCM: MIROC (medres) was significantly different for lowlands compared to the other stages. These results are attributable mainly to the differences of the simulations of precipitation of the GCM (Table 4). This fact evidence that, the potential growing are indeed sensitive to the climatic variations of the simulation of the GCM, even among the models considered similar on the prediction of climate change for Mexico (Conde *et al.*, 2006).

**Cuadro 5. Áreas potenciales para *S. hispanica* en tres estratos altitudinales y dos escenarios climáticos en México.**  
**Table 5. Potential areas for *S. hispanica* in three altitudinal strata and two climate scenarios in Mexico.**

Zona	Escenario (1961-1990)		Escenario 2040-2069					
	Óptimas	Sp	MPIM-ECHAM5		MIROC (medres)		UKMO_HadCM3	
			Óptimas	Sp	Óptimas	Sp	Óptimas	Sp
	Áreas óptimas y subóptimas (ha)							
bajas	1 368 233	2 010 050	347 568	3 222 452	213 741	3 409 160	367 978	3 714 268
medias	1 026 001	2 429 018	1 622 749	1 921 520	1 471 165	1 903 731	1 572 600	2 098 971
altas	12 119	635 291	185 609	1 340 630	222 141	1 277 277	217 813	1 434 501

Sp= subóptimas.

Con relación a las áreas marginales, se percibe una disminución entre 5 y 10% con los modelos MIROC (medres) y UKMO\_HadCM3 respectivamente, con respecto a la climatología de referencia, por lo tanto el cambio climático durante el presente siglo tendrá un impacto positivo en la producción de chíá en México.

A similar trend of the GCM was also observed in determining suboptimal surfaces. The Table 5 shows that there is a tendency to decrease in the lands of intermediate elevation, mainly in Jalisco; and increase in highland and lowland areas, located in the State of Mexico, Tlaxcala, and Yucatán.

La dinámica de áreas potenciales detectadas con el cambio climático, supone la aparición de zonas óptimas en las tierras de altitud intermedia y en las tierras altas de las regiones Centro-Occidente y Sur del país y desaparecen en tierras bajas en el Noreste y la Península de Yucatán (Figura 1). Estas regiones ya han sido reportadas con los cambios en los patrones de cultivos debido al cambio climático (Ramírez *et al.*, 2011; Santillán *et al.*, 2011; Márdero *et al.*, 2012).

Éstos resultados permiten afirmar que, con la presencia del cambio climático, las áreas potenciales óptimas para el cultivo de chíá, se desplazan hacia las tierras altas e intermedias en el futuro. Por lo tanto, una redistribución de las tierras de cultivos probablemente se llevará a cabo en estas zonas que varían en altitud, en el presente siglo. Dado que en la actualidad, las tierras de altitud intermedia incluyen 45% de la superficie agrícola, esta redistribución no sería de un alto impacto; sin embargo, cuando el cambio climático impulse a los cultivos a emigrar a tierras altas, se presentará una situación complicada, ya que en la actualidad sólo 18% de la superficie agrícola se encuentra dentro de las tierras altas.

## Conclusiones

Las proyecciones de temperatura de los tres MCG utilizados señalan consistentemente un incremento térmico en un rango de 2.6 a 2.9, 2.7 a 3.3 y 2.4 a 3.1 °C en zonas bajas, intermedias y altas, respectivamente, al pasar del período 1961-1990 al período 2040-2069. Las proyecciones de precipitación no fueron tan consistentes entre los modelos, ya que algunos señalan disminución de la lluvia y otros un incremento, aunque en todos los casos estos cambios se ubican en el rango de 0.7 a 13%. Dos de tres modelos reflejaron una disminución de la precipitación anual para el periodo 2040-2069 en tierras bajas, un incremento de 2 a 4% en tierras de altitud intermedia, y una caída de la precipitación de 2 a 12% en tierras altas. El modelo MIROC (medres) simuló consistentemente menores cantidades de precipitación anual en los tres estratos altitudinales.

Los cambios climáticos proyectados afectarán la extensión y la distribución altitudinal de la superficie con condiciones agroclimáticas óptimas y subóptimas para el cultivo de *S. hispanica*.

La superficie potencial de cultivo con condiciones agroclimáticas óptimas y subóptimas actualmente se concentra más en tierras bajas e intermedias (0 a 2 200 m).

Regarding the marginal areas, there is a decrease between 5 and 10% with MIROC (medres) and UKMO\_HadCM3 models, respectively, with respect to the climatology of reference therefore climate change during this century will have a positive impact on chia production in Mexico.

The dynamics of identified potential areas to climate change expects the emergence of optimal land areas of intermediate elevation and also in the highlands of Central and South West regions of the country and disappear in the lowlands in the northeast and in the Yucatan Peninsula (Figure 1). These regions have already been reported with changes in cropping patterns due to climate change (Ramírez *et al.*, 2011; Santillán *et al.*, 2011; Mardero *et al.*, 2012).

These results confirm that, the presence of climate change on the optimal potential growing areas of chia move towards the high and intermediate lands in the future. Therefore, a redistribution of farmland will likely take place in these areas ranging in the same elevation, in the present century. Considering that today, the lands of intermediate elevation include 45% of the agricultural area, this redistribution would not be a high impact; however, when climate change impulse crops to migrate to higher lands, a difficult situation will be presented, since currently only 18% of the agricultural areas are located within the Highlands.

## Conclusions

The temperature projections of the three GCM used, consistently show a temperature increase in the range of 2.6 to 2.9, 2.7 to 3.3 and 2.4 to 3.1 °C in low, intermediate and high zones, respectively, going for the period 1961-1990 to 2040-2069. Precipitation projections were not that consistent between models, since some point out decreases in rainfall and other increases, although, in all cases these changes are located in the range 0.7 to 13%. Two, out of three models showed a decrease in annual precipitation for the period 2040-2069 in the lowlands, an increase of 2-4% in intermediate elevation lands, and a drop in rainfall of 2-12% in the highlands. The MIROC model (medres) simulated consistently smaller amounts of annual rainfall in the three altitudinal strata.

The projected climate change will affect the extent and altitudinal distribution of the surface with optimal and suboptimal growing conditions for the cultivation of *S. hispanica*.

Con los cambios climáticos esperados, la superficie óptima de cultivo se incrementará con un rango de 43 a 58% en zonas de altitud intermedia y de 1 432 a 1 733% en las regiones altas; este incremento se ubicará principalmente en los estados de Jalisco, Michoacán, Guerrero, Puebla, Morelos y Oaxaca y disminuirá con un rango de 84 a 73% en zonas bajas, y se ubicará en los estados de Sinaloa, Tamaulipas y Chiapas.

En los tres estratos altitudinales se detectaron zonas subóptimas para el cultivo de *S. hispanica*; sin embargo, con la presencia del cambio climático esta superficie disminuirá con un rango de 14 a 22% en zonas con altitud intermedia, ubicándose principalmente en Jalisco; y aumentará de 60 a 85% en zonas bajas y entre 101 a 126% en tierras altas, que corresponden a los estados de Tlaxcala, Yucatán y Estado de México.

Las áreas marginales para el cultivo de chíca disminuirán entre 5 y 10% por la presencia del cambio climático con los modelos MIROC (medres) y UKMO\_HadCM3, por lo tanto se presentará durante el presente siglo un impacto positivo en la producción de este cultivo en México.

The potential growing surface with optimal and suboptimal conditions currently focuses more on low and intermediate lands (0-2 200 m). With the expected climate changes, the optimal growing area will increase from 43 to 58% in areas of intermediate elevation and, from 1432 to 1733% in the highlands; this increase will be mainly located in the States of Jalisco, Michoacán, Guerrero, Puebla, Morelos and Oaxaca and, will decrease from 84 to 73% in lower areas, located in the States of Sinaloa, Tamaulipas and Chiapas.

In the three altitude strata, suboptimal zones were detected for growing *S. hispanica*; however, the presence of climate change will reduce this area from 14 to 22% in areas with intermediate elevation, mainly located in Jalisco; and will increase from 60 to 85% in low areas and between 101-126% in the highlands, corresponding to the States of Tlaxcala, Yucatán and State of Mexico.

The marginal growing areas for chia will decrease between 5 and 10% due to the presence of climate change with MIROC (medres) and UKMO\_HadCM3 models, therefore during this century there will be a positive impact on the production of this crop in Mexico.

*End of the English version*



## Literatura citada

- Attipalli, R. R.; Girish, K. R. and Agepati, S. R. 2010. The impact of global elevated CO<sub>2</sub> concentration on photosynthesis and plant productivity. *Current Sci.* 99(1):46-57.
- Brohan, P.; Kennedy, J. J.; Harris, I.; Tett, S. F. B. and Jones, P. D. 2006. Uncertainty estimates in regional and global observed temperature changes: a new data set from 1850. *J. Geophys. Res.* 111:D12106.
- Capitani, M. I. 2013. Caracterización y funcionalidad de subproductos de chíca (*Salvia hispanica* L.) aplicación en tecnología de alimentos. Tesis Doctoral. Universidad Nacional de la Plata-Facultad de Ciencias Exactas. Buenos Aires, Argentina. 204 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(3):181-194.
- Deryng, D.; Sacks, W.; Barford, C. and Ramankutty, N. 2011. Simulating the effects of climate and agricultural management practices on global crop yield. *Glob. Biogeochem. Cycles* (25), GB2006. 18 pp.
- Di Sapio, O.; Bueno, M.; Busilacchi, H.; Quiroga, M. y Severin, C. 2012. Caracterización morfoanatómica de hoja, tallo, fruto y semilla de *Salvia hispanica* L. (Lamiaceae). *Bol. Latinoam. Caribe Plant. Med. Aromat.* 11(3):249-268.
- Díaz, P. G.; Guajardo P. R. A.; Medina, G. G.; Sánchez, C. I.; Soria, R. J.; Vázquez, A. M. P.; Quijano, C. J. A.; Legorreta, P. F. y Ariel, R. C. J. 2012. Potencial productivo de especies agrícolas de importancia socioeconómica en México. 1ª. (Ed.). INIFAP. Xalapa, Veracruz, México. 140 p.
- Eastman, J. R. 2012. Idrisi selva manual. Manual versión 17. Clark Labs, Clark University. Worcester, Mass., USA. 322 p.
- García, E. 1988. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen (para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana). 4ª. Ed. Offset Larrios. México, D. F. 219 p.
- Gomall, J.; Betts, R.; Burke, E.; Clark, R.; Camp, J.; Willet, K. and Wiltshire, A. 2010. Implications of climate change for agricultural productivity in the early twenty-first century. *Phil. Trans. R. Soc. B.* 365:2973-2989.
- 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.
- Hernández, G. J. A. y Miranda, C. S. 2008. Caracterización morfológica de chíca (*Salvia hispanica*). *Rev. Fitotec. Mex.* 31(2):105-113.
- 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.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2013. Climate Change 2013. The physical science basis. Working group I contribution to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Summary for policymakers. Stocker, F. T.; Qin, D.; Plattner, K. G.; Tignor, M. B. M.; Allen, K. S.; Boschung, J.; Nauels, A.; Xia, Y.; Bex, V. and Midgley, M. P. (Eds.). Switzerland. 27 p.

- IBM Corp. 2010. IBM SPSS Statistics for Windows, version 19.0. Armonk, N.Y.: IBM Corp.
- Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI). 2009. Guía para interpretación cartográfica: uso de suelo-vegetación Serie III. D. F. México. 71 p.
- Jamboonsri, W.; Phillips, T. D.; Geneve, R. L.; Cahill J. P. and Hildebrand, D. F. 2012. Extending the range of an ancient crop, *Salvia hispanica* L.-a new  $\omega$ 3 source. *Genet. Resour. Crop Eval.* 59:171-178.
- Johnson, F.; Sharma, A. 2009. Measurement of GCM skill in predicting variables relevant for hydroclimatological assessments. *J. Climate.* 22:4373-4382.
- Justin, E. B.; Desai, R. A.; Dirmeyer, P. A. and Foley, A. J. 2012. Effects of land cover change on moisture availability and potential crop yield in the world's breadbaskets. *Environ. Res. Lett.* 7:1-9.
- Kruskal, W.H. and Wallis, A. W. 1952. Use of ranks in one-criterion variance analysis. *J. Am. Statistical Association.* 47(260): 583-621.
- Kumar, K. K.; Kumar, K. R.; Ashrit, R. G.; Deshpande, N. R. and Hansen, J. W. (2004). Climate impacts on Indian agriculture. *Int. J. Climatol.* 24:1375-1393.
- Lobell, D. B. and Burke, M. B. 2008. Why are agricultural impacts of climate change uncertain? The importance of temperature relative to precipitation. *Environ. Res. Lett.* 3:1-8.
- Márdero, S.; Nickl, E.; Schmook, B.; Schneider, L.; Rogan, J.; Christman, Z. and Lawrence, D. 2012. Sequías en el sur de la Península de Yucatán: análisis de la variabilidad anual y estacional de la precipitación. *Investigaciones Geográficas.* 78:19-33.
- Medina, G. G.; Ruiz, C. J. A. and Martínez, P. A. R. 1998. Los climas de México: una estratificación ambiental basada en el componente climático. Libro técnico Núm. 1. SAGAR-INIFAP. 104 p.
- Ojeda, B. W.; Sifuentes, I. E.; Ñíguez, 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, L. M. R.; Ruiz, C. J. A.; Medina, G. G.; Jacobo, C. J. L.; Parra, Q. R. A.; Ávila, M. M. R. y Jesús, P. A. A. J. P. (2011). Perspectivas del sistema de producción de manzano en Chihuahua, ante el cambio climático. *Rev. Mex. Cienc. Agríc. (2):*265-279.
- Ramírez, J. G.; Rosado, R. J. G.; Castellanos, R. A. F. y Chel, G. L. A. 2012. Potencial productivo para el cultivo de chia (*Salvia hispanica* L.) en México y calidad del aceite Extraído. *Rev. Fac. Ing. Quím.* 52:32-36.
- Ruiz, C. J. A.; Medina, G. G.; González, I. J.; Ortiz, C.; Flores, L. H. E.; Martínez, R. A. y Byerly, K. F. 1999. Requerimientos agroecológicos de cultivos. Libro técnico Núm. 3. INIFAP-CIRPAC. Ed. Conexión Gráfica. Guadalajara, Jalisco, México. 362 p.
- Ruiz, C. J. A.; Medina, G. G.; Ramírez, D. J. L.; Flores, L. H. E.; Ramírez, O. G.; Manríquez, O. J. D.; Zarazúa, V. P.; González, E. D. R.; Díaz, P. G. y De la Mora, O. C. 2011. Cambio climático y sus implicaciones en cinco zonas productoras de maíz en México. *Rev. Mex. Cienc. Agríc. (2):*309-323.
- Santillán, E. L. E.; Blanco, M. F.; Magallanes, Q. R.; García, H. J. L.; Cerano, P. J.; Delgadillo, R. O. y Valdez, C. R. D. 2011. Tendencias de temperatura extremas en Zacatecas, México. *Rev. Mex. Cienc. Agríc. (2):*207:219.
- 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.
- Trenberth, K. E.; Jones, P. D.; Ambenje, P.; Bojariu, R.; Easterling, D. R.; Kleint-Tank, A.; Parker, D.; Rahimzadeh, F.; Renwick, J. A.; Rusticucci, M.; Soden, B. and Zhai, P. 2007. Observations: surface and atmospheric climate change. *Climate Change 2007: the physical science basis. Contribution of wg i to the fourth assessment report of the IPCC.* Cambridge University Press 321 pp.
- Vázquez, O. A.; Rosado, R. J. G.; Chel, G. L. A. and Betancur, A. D. 2009. Physicochemical properties of a fibrous fraction from chia. (*Salvia hispanica* L). *Food Sci. Technol.* 42:168-173.
- Woodhouse, C. A.; Meko, D. M.; MacDonald, G. M.; Stahle, D. W. and Cook, E. R. A. 2010. 1,200-year perspective of 21<sup>st</sup> century drought in southwestern North America. *Proc. Natl Acad. Sci. USA.* 107:21283-21288.