

## Impactos del cambio climático en la distribución geográfica de *Gossypium hirsutum* L. en México\*

### Impact of climate change on the geographic distribution of *Gossypium hirsutum* L. in Mexico

Gabriela Ramírez-Ojeda<sup>1</sup>, José Ariel Ruiz-Corral<sup>1§</sup>, Claudia Pérez-Mendoza<sup>2</sup>, Raymundo Villavicencio-García<sup>3</sup>, Salvador Mena Munguía<sup>3</sup> y Noé Durán-Puga<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Campo Experimental Centro Altos de Jalisco-INIFAP. Carretera Libre Tepatitlán-Lagos de Moreno km 8. Tepatitlán de Morelos, Jalisco, México. <sup>2</sup>Centro Nacional de Recursos Genéticos- INIFAP. Carretera Libre Tepatitlán-Lagos de Moreno km 8. Tepatitlán de Morelos, Jalisco, México. <sup>3</sup>Universidad de Guadalajara, Centro Universitario de Ciencias Biológicas y Agropecuarias. Carretera a Nogales km. 15.5, Predio Las Agujas S/N, Zapopan, Jalisco, México. <sup>4</sup>Unidad Académica de Agricultura. Universidad Autónoma de Nayarit. Carretera Tepic-Compostela, km 9. Xalisco, Nayarit, México. <sup>§</sup>Autor de correspondencia: ruiz.ariel@inifap.gob.mx.

#### Resumen

El cambio climático derivado del calentamiento global se prevé tendrá importantes efectos sobre los recursos fitogenéticos, lo cual tiene implicaciones significativas en la agricultura, ya que dichos recursos se asume poseen genes que pueden aportar características de rusticidad relacionadas con condiciones climáticas más extremas. La presente investigación tuvo como objetivo estimar el efecto del cambio climático sobre la distribución geográfica de *Gossypium hirsutum* en México. Para ello se utilizaron los datos pasaporte de 387 accesiones realizadas entre 1980 y 2011 por nueve instituciones nacionales e internacionales. Se simuló la distribución potencial de *G. hirsutum* para la climatología de referencia 1961-1990 y un escenario de cambio climático 2040-2069 utilizando el modelo Maxent. La información climática se obtuvo del portal WorldClim Earth System Grid de donde se descargaron imágenes tipo ASCII con una resolución espacial de 2.5 minutos. Para el escenario de cambio climático 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, en formato ASCII y con resolución espacial de 2.5 min. Ambas

#### Abstract

Climate change due to global warming is expected to have important effects on plant genetic resources, which has significant implications for agriculture, since it is assumed that these resources have genes that can provide features related hardiness "for most extreme weather conditions. The present study aimed to estimate the effect of climate change on the geographic distribution of *Gossypium hirsutum* in Mexico. The passport data of 387 accessions conducted between 1980 and 2011 by nine national and international institutions were used. Potential distribution of *G. hirsutum* was simulated, reference climatology for 1961-1990 and 2040-2069 climate change scenario using the model Maxent. Climate information was obtained from the portal WorldClim Earth System Grid where ASCII type images are downloaded with a spatial resolution of 2.5 minutes. For the 2040-2069 climate change scenario three general circulation models (MCG) were considered ECHAM5, MIROC (Medres) and UKMO\_HADCM3 low emission scenario of greenhouse gases A2 in ASCII format with spatial resolution of 2.5 min. Both climatologies were worked to Idrisi selva software. The modelling results

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

climatologías fueron trabajadas con el software Idrisi Selva. Los resultados de la modelación muestran que en los tres MGG se verá favorecida la distribución de *G. hirsutum* L. por el cambio climático, aumentando considerablemente las zonas en las que aparece actualmente.

**Palabras clave:** *Gossypium hirsutum* L., cambio climático, distribución geográfica, recursos fitogenéticos.

## Introducción

La agricultura es uno de los sectores más vulnerables a los impactos del cambio climático (FAO, 2007). La agricultura de temporal y aún la agricultura de riego, son sensibles a los cambios en los patrones climáticos regionales, incluso a escala interanual. Las predicciones climáticas del Siglo XXI (IPCC, 2007) no son promisorias y más bien señalan que el cambio climático se acentuará durante el transcurso del presente siglo y establecerá condiciones más extremas para los cultivos, tanto en condiciones de temperatura como de humedad, por lo que será necesario generar medidas de adaptación a las nuevas condiciones climáticas. Una de las medidas más importantes que se visualizan, es la generación de nuevas variedades, las cuales se prevé deberán adaptarse a ambientes más cálidos y probablemente menos húmedos (IPCC, 2007; Zarazúa, 2011).

Ante este panorama, es muy probable que se requiera la formación de nuevas poblaciones genéticas para alimentar la generación de genotipos con tales características. En este proceso, la utilización de parientes silvestres de los cultivos será fundamental, ya que se sabe que en estos recursos fitogenéticos se encuentran genes asociados a una mayor rusticidad con relación a varios factores ligados a la producción de cultivos, tales como resistencia a sequía (Ruiz *et al.*, 2008), resistencia a altas y bajas temperaturas (López *et al.*, 2005; Ruiz *et al.*, 2013), y resistencia al ataque de plagas y enfermedades (De la Paz *et al.*, 2010), entre otros.

La presencia y distribución de las especies silvestres está estrechamente relacionada con sus requerimientos agroclimáticos, y como estos requerimientos son satisfechos en los diversos ambientes (FAO, 2007). La presencia del cambio climático puede constituir una amenaza para la satisfacción de estos requerimientos y por lo tanto para la presencia y distribución de las especies silvestres (Jarvis *et al.*, 2008).

show that in the three MGG, the distribution *G. hirsutum* L. will be favoured by climate change, greatly increasing the areas in which it now appears.

**Keywords:** *Gossypium hirsutum* L., climate change, geographical distribution, plant genetic resources.

## Introduction

Agriculture is one of the most vulnerable sectors to the impacts of climate change (FAO, 2007). The rainfed and irrigated agriculture yet are sensitive to changes in regional weather patterns, including interannual scale. Climate predictions of twenty-first century (IPCC, 2007) are not promising and rather indicate that climate change will be emphasized during the course of this century and established most extreme conditions for crops, both in terms of temperature and humidity, so it will be necessary to generate measures of adaptation to new climatic conditions. One of the most important steps that are displayed, is the generation of new varieties, which are expected to be adapted to warmer and probably less humid environment (IPCC, 2007; Zarazúa, 2011).

Against this background, it is likely that the formation of new gene to feed the generation of genotypes with features such populations required. In this process, the use of wild relatives of crops will be critical, since it is known that associated genes found in these plant genetic resources for higher hardiness in relation to several factors related to crop production, such as drought resistance (Ruiz *et al.*, 2008), resistance to high and low temperatures (López *et al.*, 2005; Ruiz *et al.*, 2013), and resistance to pests and diseases (De la Paz *et al.*, 2010), among other.

The presence and distribution of wild species is closely related to their agroclimatic requirements and how those requirements are satisfied in various environments (FAO, 2007). The presence of climate change may threaten the satisfaction of these requirements and thus for the presence and distribution of wild species (Jarvis *et al.*, 2008).

Mexico is considered as one of the countries with the highest biodiversity (Mittermeier and Goettsch, 1992), among other factors due to its great climatic diversity (García, 2004). It is currently estimated that 12% of

México, es considerado como uno de los países con mayor diversidad biológica (Mittermeier y Goettsch, 1992), debido entre otros factores a su gran diversidad climática (García, 2004). Actualmente se estima que 12% de la biodiversidad total mundial se localiza en México; de esta biodiversidad, 12% de los géneros y 50-60% de las especies de plantas son endémicas (CONABIO, 2006).

Con la presencia del cambio climático, la diversidad de climas del país se puede ver alterada, de tal forma que puede modificarse la composición de los ecosistemas (Lasco *et al.*, 2008; Schneider *et al.*, 2009), así como la distribución geográfica de los recursos fitogenéticos del país. *Gossypium hirsutum* es considerado uno de estos recursos, ya que México junto con Centroamérica, es considerado centro de origen de esta especie (Jenkins, 2003). La importancia de este recurso consiste en que actualmente 90% de la producción mundial de algodón se obtiene a partir de *G. hirsutum*. Probablemente los pobladores nativos de la Península de Yucatán fueron los primeros en domesticar *G. hirsutum* (Brubaker y Wendel, 1994). Estas formas iniciales de algodón semi-domesticado se dispersaron al resto de Mesoamérica y hacia el interior del Caribe (Iqbal *et al.*, 2001). A partir de aquí, ocurrió una selección hacia una latencia de semilla reducida, un hábito de crecimiento anual, y una floración independiente del fotoperiodo, creando genotipos muy similares a los cultivares actuales (OGTR, 2008).

El objetivo de la presente investigación fue determinar el impacto potencial del cambio climático sobre los nichos de distribución geográfica de *G. hirsutum* L. bajo un escenario de referencia y de cambio climático con tres modelos de circulación general (MCG): ECHAM5, MIROC (Medres) y UKMO\_HADCM3, bajo el escenario de emisiones de gases de efecto invernadero A2. Para esto, se utilizan algoritmos o modelos de nichos de distribución.

Uno de estos modelos es Maxent, el cual es un método de inteligencia artificial que aplica el principio de máxima entropía para calcular la distribución geográfica más probable para una especie. El resultado del modelo expresa el valor más adecuado del hábitat potencial para la especie en función de las variables ambientales utilizadas. Un valor alto de la función de distribución en cada pixel indica que éste presenta condiciones favorables para encontrar dicha especie (Phillips *et al.*, 2008; Morales, 2012). Dicho modelo ha sido utilizado recientemente para determinar tanto la distribución de especies de plantas, animales e insectos

the total world's biodiversity is found in Mexico; this biodiversity, 12% of genera and 50-60% of the plant species are endemic (CONABIO, 2006).

With the presence of climate change, climate diversity of the country may be altered, so that may change the composition of ecosystems (Lasco *et al.*, 2008; Schneider *et al.*, 2009) and the geographical distribution of plant genetic resources. *Gossypium hirsutum* is considered one of these resources, as Mexico with Central America is considered the centre of origin of this species (Jenkins, 2003). The importance of this resource is that currently 90% of world cotton production is derived from *G. hirsutum*. Probably the native inhabitants of the Yucatán Peninsula were the first to domesticate *G. hirsutum* (Brubaker and Wendel, 1994). These early forms of semi-domesticated cotton dispersed to other Middle and into the Caribbean (Iqbal *et al.*, 2001). From here, there was a selection to a reduced seed dormancy, annual growth habit and photoperiod independent flowering, creating very similar genotypes to current cultivars (OGTR, 2008).

The aim of this investigation was to determine the potential impact of climate change on the geographic distribution of niches *G. hirsutum* L. under baseline and climate change with three GCMs (MCG). ECHAM5, MIROC (Medres) and UKMO\_HADCM3 under the scenario of greenhouse gas A2 greenhouse. For this, algorithms and models are used distribution niches.

One of these models is Maxent which is a method of artificial intelligence that applies the principle of maximum entropy to calculate the most probable geographic distribution for a species. The result of the model expresses the most appropriate value of the potential habitat for the species as a function of environmental variables used. A high value of the distribution function at each pixel indicates that it has favourable conditions to find the species (Phillips *et al.*, 2008; Morales, 2012). This model has recently been used to determine both the distribution of species of plants, animals and insects (Contreras *et al.*, 2010; González *et al.*, 2010; Ibarra *et al.*, 2010; Sork *et al.*, 2010; Torres and Khayat, 2010; Paredes *et al.*, 2011; Sobek *et al.*, 2012).

The comparison between the results of three different MCG give an idea of the trend of the distribution of the species under study.

(Contreras *et al.*, 2010; González *et al.*, 2010; Ibarra *et al.*, 2010; Sork *et al.*, 2010; Torres y Jayat, 2010; Paredes *et al.*, 2011; Sobek *et al.*, 2012).

La comparación entre los resultados obtenidos de los tres diferentes MCG, dará una idea de la tendencia de la distribución de la especie en estudio.

## Materiales y métodos

### Bases de datos

Se utilizó una base de datos de 387 accesiones geo-referenciadas de *G. hirsutum* L., las cuales se realizaron entre 1980 y 2011 por parte de nueve instituciones: Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), Instituto Nacional de Ecología (INECOL), Universidad Autónoma de México (UNAM), Centro de Investigaciones Científicas de Yucatán (CICY), Departamento de Agricultura de Estados Unidos (USDA), Universidad Autónoma de Yucatán (UAY), Universidad Autónoma de Chapingo (UACH), Colegio de Postgraduados en Ciencias Agrícolas (CP) y Jardín Botánico de Missouri (JBM).

Para la caracterización de las condiciones ambientales de los sitios de colecta, se utilizó la climatología de WorldClim correspondiente al periodo climático 1960-1990. Para la modelación de los nichos de distribución de *G. hirsutum* se utilizó la climatología anteriormente mencionada y el escenario de cambio climático 2040-2069 donde se consideraron tres MCG (ECHAM5, MIROC (Medres) y UKMO\_HADCM3) considerando un escenario de emisiones de gases de efecto invernadero tipo A2. Todos estos con una resolución espacial de 2.5 minutos. Ambos sistemas de información geográfica se compilaron en el software IDRISI Selva (Eastman, 2013). Además de estas variables, se incluyeron otras variables de diagnóstico de tipo edáficas y topográficas provenientes del sistema de información ambiental (SIAN) del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias (Díaz *et al.*, 2012).

### Variables de estudio

A partir de las coordenadas geográficas de los sitios de colecta, se generó un archivo vectorial y, con los archivos raster correspondientes a la climatología de referencia,

## Materials and methods

### Databases

A database of 387 geo-referenced accessions was used which took place between 1980 and 2011 by nine institutions: National Research Institute for Forestry, Agriculture and Livestock (INIFAP), National Institute of Ecology (INECOL), Autonomous University of Mexico (UNAM), Yucatan Centre for Scientific Research (CICY), Department of Agriculture of the United States (USDA), Autonomous University of Yucatan (UAY), Chapingo Autonomous University (UACH), Graduate College of Science Agricultural (CP) and the Missouri Botanical Garden (MBG).

The climatology WorldClim for the climate period 1960-1990 was used to characterize the environmental conditions of the collection sites. To model the distribution niches of *G. hirsutum* the aforementioned weather and climate change scenario was used, as well as the climate change scenario 2040-2069, considering three MCGs (ECHAM5, MIROC (Medres) and UKMO\_HADCM3) by considering a scenario of greenhouse gas, A2. All of these with a spatial resolution of 2.5 minutes. Both GIS were compiled in the Idrisi selva software (Eastman, 2013). In addition to these variables, other variables of diagnostic soil type and topography from the environmental information system (SIAN) of the National Research Institute of Livestock Agricultural and Forestry were also included (Díaz *et al.*, 2012).

### Study variables

From the geographical coordinates of the collection sites, a vector file was generated and, with appropriate reference to the climate of raster file used was made of the GIS Analysis system module IDRISI Selva (Eastman, 2013) to extract accession timely information related to the following variables: average annual accumulated precipitation (PAA), mean annual temperature (TMA), average annual minimum temperature (TIA), maximum average temperature (TXA), maximum mean temperature of the warmest month (TXMMC), mean minimum temperature of the coldest month (TIMMF) and altitude (A).

Slope, annual temperature variation, temperature variation, precipitation, average minimum temperature, average temperature and average maximum temperature from

se hizo uso del módulo GIS Analysis del sistema IDRISI Selva (Eastman, 2013), para extraer información puntual por accesión, relacionada con las siguientes variables: precipitación acumulada media anual (PAA), temperatura media anual (TMA), temperatura mínima media anual (TIA), temperatura máxima media anual (TXA), temperatura máxima media del mes más cálido (TXMMC), temperatura mínima media del mes más frío (TIMMF) y altitud (A).

Para la modelación de los nichos de distribución se utilizaron las variables anteriormente mencionadas, más las siguientes: pendiente, oscilación térmica anual, oscilación térmica, precipitación, temperatura mínima media, temperatura media y temperatura máxima media de los períodos mayo-octubre y noviembre-abril.

### Modelación de la distribución geográfica

Para determinar la distribución geográfica potencial de *G. hirsutum* se utilizó el modelo Maxent (Phillips *et al.*, 2006) versión 3.3.3 k, el cual ha sido evaluado y probado como uno de los mejores modeladores de nichos de distribución (Elith *et al.*, 2006). Dicho software se basa en el principio estadístico de máxima entropía, el cual calcula la probabilidad de distribución de máxima entropía (la distribución más próxima a la uniforme), a partir de datos de presencia (colecta) y ausencia (lugares sin datos), ajustando la distribución de especies al conjunto de píxeles del área de estudio y tomando como principio la idea de que la mejor explicación a un fenómeno desconocido maximizará la incertidumbre de la distribución de la probabilidad dependiendo de aquellos píxeles en los cuales la especie ha sido detectada (Phillips *et al.*, 2004, 2006). El resultado final es una expresión del tipo:

$$P(x) = \frac{\exp(C1 * F1(x) + C2 * F2(x) + C3 * F3(x) \dots)}{Z}$$

Donde= C1, C2...Cn, son constantes; F1, F2...Fn, son las variables climáticas y Z es una constante que asegura que la suma de todos los valores de P para todas las celdas sea igual a 1.

El resultado se puede dar por tres tipos de salidas: crudo, acumulativo y logístico, para el presente caso se utilizó la salida de tipo logística, la cual proporciona como resultado un mapa de distribución potencial donde el rango máximo de aptitud ambiental se ubica entre 0 y 1.

May to October and November-April periods: to model the distribution of niche, plus the following variables were used above.

### Modelling the geographic distribution

In order to determine the potential geographic distribution of *G. hirsutum* we used the model Maxent (Phillips *et al.*, 2006) version 3.3.3 k, which has been tested and proven as one of the best modellers niche distribution (Elith *et al.*, 2006). This software is based on the statistical principle of maximum entropy, which calculates the probability distribution of maximum entropy (closest to the uniform distribution), from presence data (collection) and absence, adjusting species distribution to all pixels in the study area and on the principle the idea that the best explanation for an unknown phenomenon maximize uncertainty probability distribution depending on those pixels where the species has been detected (Phillips *et al.*, 2004, 2006). The end result is an expression of the type:

$$P(x) = \frac{\exp(C1 * F1(x) + C2 * F2(x) + C3 * F3(x) \dots)}{Z}$$

Where= C1, C2 ... Cn, are constant; F1, F2 ... Fn are climate variables and Z is a constant which ensures that the sum of all values of P for all cells is equal to 1.

The result can be given by three types of outputs: raw, cumulative and logistics, for this case the output of logistic type is used, which provides results in a map of potential distribution where the maximum ambient fitness is between 0 to 1.

### Ecological descriptors

Organic descriptors were determined for *G. hirsutum* from all collection points used for analysis and climatic range in which they settle. This was done using the "IDRISI Selva" system with raster images of each environmental variable and the geographical coordinates of each point of collection. After obtaining these data, outliers were sought to establish environmental ranges in which the species is established.

## Results and discussion

The Table 1 shows some basic statistics of environmental variables sites of the accession that describe *G. hirsutum*. The environmental ranges of this species are large. This

## Descriptorios ecológicos

Se determinaron los descriptorios ecológicos de *G. hirsutum* a partir de todos los puntos de colecta utilizados para el análisis y los rangos climáticos en los que se establecen. Esto se realizó utilizando el sistema IDRISI Selva, las imágenes raster de cada variable ambiental y las coordenadas geográficas de cada punto de colecta. Una vez obtenidos estos datos, se buscaron los valores extremos para establecer los rangos ambientales en los que se establece la especie.

## Resultados y discusión

En el Cuadro 1 se describen algunas estadísticas básicas de variables ambientales de los sitios de acesión de *G. hirsutum*. Como puede verse, los rangos ambientales de distribución de esta especie son amplios. Esto señala la rusticidad de esta especie, característica que podría ser favorable en ambientes donde el cambio climático se manifieste de manera más agresiva (FAO, 2007).

El valor máximo, el valor mínimo y el valor promedio de cada variable expresada en el Cuadro 1 constituyen también los descriptorios ecológicos de *G. hirsutum*. De acuerdo con las accesiones analizadas, el rango de precipitación anual varía entre 198 y 1945 mm, valores que contrastan (sobre todo el valor mínimo) con lo señalado por Aragón (1995) quien establece un rango de 750 a 1 500 mm anuales. Asimismo, los límites altitudinales resultado del análisis de las accesiones estudiadas, reportan que el rango de distribución de *G. hirsutum* va de los 0 a 2 344 m, valores que difieren con lo reportado por Baradas (1994), quien señala que el rango de distribución altitudinal es de 0 a 600 m.

Así mismo puede observarse que la especie se adapta a un gran rango climático, ya que puede encontrarse en sitios donde la temperatura varía desde los -0.1 hasta los 41.2 °C.

En la Figura 1, se muestran las accesiones utilizadas para la modelación de *G. hirsutum* con el software Maxent, donde claramente puede observarse que la especie se distribuye en la región subhúmeda cálida del país, presentándose algunas accesiones en la región árida.

Este algoritmo realiza algunas pruebas estadísticas a partir de 25% de datos asignados en el random test. Una de las estadísticas realizadas es referente a la sensibilidad vs la

points to the hardness of this species, a feature that could be beneficial in environments where climate change will manifest more aggressively (FAO, 2007).

The maximum value, minimum value and average value of each variable expressed in Table 1 also represent descriptors ecological *G. hirsutum*. According to the accessions tested, the range of annual precipitation varies between 198 and 1945 mm, contrasting values (especially the minimum value) with those reported by Aragón (1995) who sets a range from 750 to 1 500 mm annually. Also, the analysis result altitudinal limits of the accessions studied, reported that the distribution range of *G. hirsutum* goes from 0 to 2 344 m, values that differ from those reported by Baradas (1994), who notes that the altitudinal range is from 0 to 600 m.

Also, the species is adapted to a wide climatic range, as might find them in places where the temperature ranges from -0.1 up to 41.2 °C.

### Cuadro 1. Estadísticas básicas de variables ambientales y descriptorios ecológicos de *G. hirsutum* L.

Table 1. Basic statistics of environmental variables and ecological descriptors of *G. hirsutum* L.

| Variable   | Valor mínimo | Valor máximo | Valor promedio |
|------------|--------------|--------------|----------------|
| A (msnm)   | 0            | 2 344        | 331            |
| Ota (°C)   | 7.08         | 18.8         | 12.4           |
| Paa (mm)   | 198          | 1945         | 1021           |
| Timmf (°C) | -0.1         | 20.1         | 14.9           |
| Tia (°C)   | 8.5          | 22.5         | 18.4           |
| Tmmmf (°C) | 8            | 26.8         | 21.6           |
| Tmmmc (°C) | 16           | 32           | 26.8           |
| Tma (°C)   | 15.4         | 29.1         | 24.6           |
| Txmmc (°C) | 20.4         | 41.2         | 32.6           |
| Txa (°C)   | 20.6         | 36.6         | 30.9           |

In the Figure 1, are shown the accessions used for the modelling of *G. hirsutum* using the software Maxent where we can clearly see that, the species is distributed in the warm sub-humid region of the country, presenting some accessions in the arid region.

This algorithm performs some statistical tests based on 25% of data allocated in the random test. One of the statistics is performed regarding sensitivity vs. specificity of data for model generation, receiver operating characteristic (ROC); i.e., the ratio of true positives against the rate of false positives, corresponding to the probability of selecting at random a pair of values, one positive (pixel with presence of

especificidad de los datos para la generación del modelo, Receiver Operating Characteristic (ROC); es decir, la razón de verdaderos positivos frente a la razón de falsos positivos, correspondiente a la probabilidad de que tomando al azar un par de valores, uno positivo (pixel con presencia de la especie) y otro negativo (pixel con ausencia de la especie), el modelo adjudique al valor positivo un valor mayor (Hanley, 1982). Dicha prueba muestra que el AUC (área bajo la curva ROC) para los datos de entrenamiento es del 0.937 (datos empleados en la generación del modelo), esto significa que el modelo se ajusta casi perfectamente.

Cabe mencionar que la especie se adapta a regiones áridas y semiáridas con climas cálidos y semicálidos (Aragón 1995; Ruiz *et al.*, 1999), aunque en el mapa puede observarse que las accesiones se encuentran en su mayoría en la región cálida húmeda del país.

En la Figura 2 (mapa a) se muestra el mapa resultante del análisis de aptitud ambiental clasificada por rangos, para la climatología de referencia. La clasificación se hizo en 5 intervalos de aptitud: muy alta, alta, media, baja y muy baja, correspondientes a rangos de aptitud de 0.20 a partir del resultado logístico arrojado por Maxent (0-1), siendo las zonas de muy baja aptitud ambiental todo aquello que se encuentra entre 0-0.20 y las de muy alta aptitud aquellas que se encuentran en rangos de 0.80-1.

the species) and negative (pixel with no species), the model awarded to the positive value higher value (Hanley, 1982). This test shows that the AUC (area under the ROC curve) for the training data is 0.937 (data used for model generation), this means that the model fits almost perfectly.

It is noteworthy that, the species is adapted to arid and semi-arid regions with warm climates and semi-warm (Aragón 1995; Ruiz *et al.*, 1999), although in the map can be seen that the accessions are mostly in the warm humid region of the country.

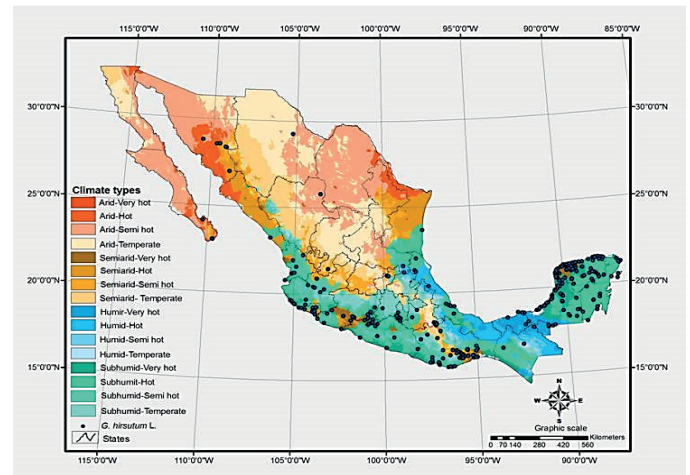


Figura 1. Tipos climáticos y accesiones de *G. hirsutum* L.  
Figure 1. Climatic types and accessions of *G. hirsutum* L.

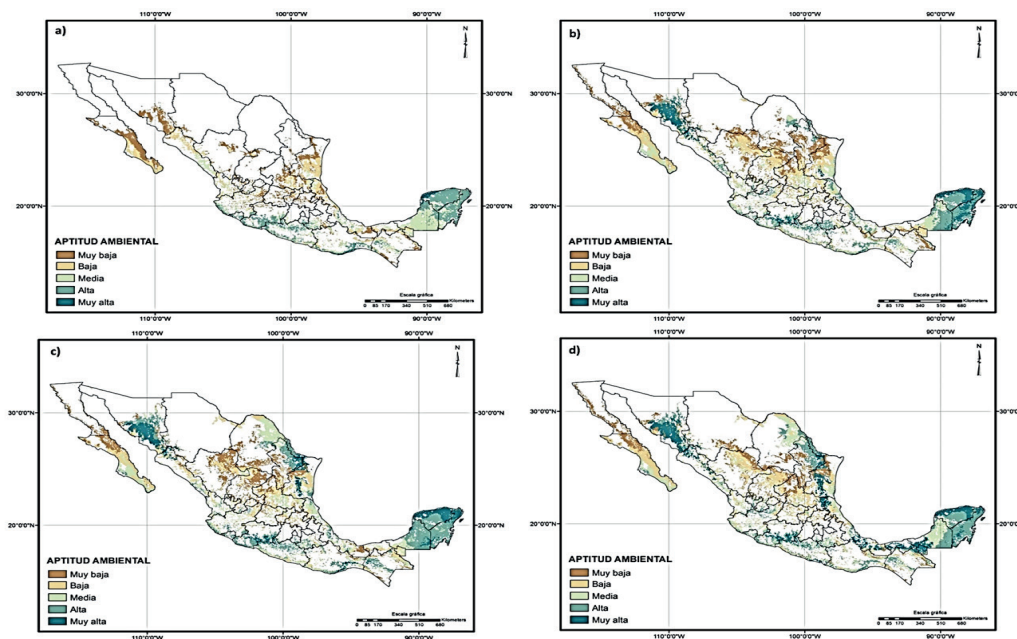


Figura 2. Aptitud ambiental de *G. hirsutum* en: a) climatología de referencia periodo 1960-1990; b) climatología 2040-2069 MCG ECHAM5; c) climatología 2040-2069 MCG UKMO\_HADCM3; y d) climatología 2040-2069 MCG MIROC (Medres).  
Figure 2. Environmental fitness of *G. hirsutum*: a) climatología reference 1960-1990 period; b) 2040-2069 climatology ECHAM5 GCM; c) 2040-2069 climatology MCG UKMO\_HADCM3; d) 2040-2069 climatology MCG MIROC (Medres).

Por otra parte, los mapas b, c y d de la Figura 2, muestran la distribución geográfica potencial de *G. hirsutum* bajo el escenario de cambio climático 2040-2069 para los diferentes MCG empleados en el presente estudio, los cuales presentan resultados muy contrastantes con la situación actual y muy similares entre sí (Cuadro 2).

Cabe mencionar que a los porcentajes mencionados en el Cuadro 2 se les restó las superficies de los cuerpos de agua, manchas urbanas y todos aquellos tipos de vegetación donde *G. hirsutum* no se puede establecer, como bosques de coníferas y vegetación riparia, por mencionar algunos. Esta capa de información proviene de la carta digital de Uso de suelo y vegetación (INEGI, 2005).

In the Figure 2, the resulting map between environmental analysis classified by ranks reference to the weather is displayed. The classification was made in 5 slots fitness: very high, high, medium, low and very low, corresponding to 0.20 fitness ranges from logistics performance thrown by Maxent (0-1), with areas of very low environmental aptitude whatever is between 0 to 0.20 and the high ability of those found in ranges of 0.80 to 1.

Moreover, the mapping b, c and d of Figure 2, showing the potential geographic distribution of *G. hirsutum* under the 2040-2069 climate change scenario for the different MCG used in this study, which have very contrasting results with the current situation and very similar to each other (Table 2).

**Cuadro 2. Porcentaje de ocupación territorial de *G. hirsutum* L. para el escenario de referencia y ocupación territorial potencial para el escenario de cambio climático 2040-2069 con tres MCG.**

**Table 2. Percentage of territorial occupation of *G. hirsutum* L., baseline for territorial occupation and potential for climate change 2040-2069 scenario with three MCGs.**

| Aptitud ambiental | Porcentaje de ocupación territorial (%) |        |             |                |
|-------------------|---|--------|-------------|----------------|
|                   | Climatología de referencia              | ECHAM5 | UKMO_HADCM3 | MIROC (Medres) |
| Muy baja          | 25.5                                    | 19.1   | 21.6        | 16.4           |
| Baja              | 23.4                                    | 22.2   | 25.9        | 24.6           |
| Media             | 26                                      | 23.3   | 21.3        | 22.6           |
| Alta              | 23.5                                    | 23.1   | 20          | 19.5           |
| Muy alta          | 1.6                                     | 12.3   | 11.2        | 17             |

De manera general se puede observar que respecto al escenario de referencia, todos los modelos presentan la misma tendencia, esto es, disminución de la categoría muy baja y aumento en las categorías de aptitud ambiental baja, media, alta y muy alta.

El modelo que presentó mayor disminución en la superficie de la categoría muy baja fue el UKMO\_HADCM3 con una disminución de 21.6%, siendo el modelo MIROC el que presentó menor disminución respecto a la climatología de referencia en esta categoría (16.4%). Respecto a las demás categorías MIROC presenta mayor ganancia en superficie en la categoría muy alta y ECHAM5 presenta mayor ganancia en las categorías media y alta.

Los modelos que presentan menor ganancia en porcentaje de superficie ocupada por categoría son ECHAM5 en la categoría baja, UKMO\_HADCM3 en la categoría media y muy alta y MIROC (Medres) en la categoría alta.

It is noteworthy that, the percentages listed in the Table 2 were subtracted in surfaces of water bodies, urban sprawl and all those types of vegetation where *G. hirsutum* cannot be set as coniferous forests and riparian vegetation, to mention a few. This layer of information comes from the digital chart using soil and vegetation (INEGI, 2005).

In general it can be seen that compared to the baseline, all models have the same trend, i.e., decreasing of the lowest category and increase in the categories of low, medium, high and very high environmental suitability.

The model that showed a higher decrease in the surface of the very low category was UKMO\_HADCM3 with a decrease of 21.6%, with model MIROC which showed less decline from baseline climatology in this category (16.4%). As for the other categories MIROC has more gain surface in the high category and ECHAM5 features higher gain in the middle and high categories.



De manera general se puede observar que todos los modelos muestran una tendencia en la cual la especie ampliará su distribución con las condiciones de cambio climático, extendiéndose a los estados de Sonora, Sinaloa, Tamaulipas y Nuevo León.

De lo mencionado anteriormente es evidente que el impacto ocasionado por el cambio climático beneficiará la distribución de *G. hirsutum* L., a diferencia de muchas otras especies cuya distribución geográfica se verá afectada por los cambios en los patrones climáticos (Jarvis, 2008; Villers, 2009; Contreras *et al.*, 2010; Sork *et al.*, 2010). Dentro del beneficio que el cambio climático traerá a *G. hirsutum* se encuentra la expansión de las áreas con alta y muy alta aptitud ambiental, lo cual provocará la aparición de nuevas áreas con este nivel de aptitud ambiental, sobre todo en la región formada por el sur del estado de Sonora y norte del estado de Sinaloa, la zona formada por la zona de colindancia de Tamaulipas y Nuevo León y la región del Golfo Sur a nivel del estado de Tabasco (Figura 2).

Estudios realizados en el suroeste de Estados Unidos de América, demuestran que los campos para cultivo de algodón (*Gossypium* sp.) incrementarán hasta en 26-36% de su condición actual, en caso de que los niveles de dióxido de carbono continúen incrementando (Doherty, 2003).

Los procesos de las plantas que son directamente afectados por cambios en la atmósfera (concentración de CO<sub>2</sub>) son principalmente la fotosíntesis, foto-respiración, respiración nocturna y transpiración (Fitter, 1987). El aumento de la temperatura bajo el cambio climático futuro, así como los niveles elevados de CO<sub>2</sub> serán benéficos para la productividad del algodón hasta cierto umbral, en donde la tasa de fotosíntesis sea menor que la óptima o el estrés ambiental sea alto (Reddy *et al.*, 2000).

## Conclusiones

Para los escenarios climáticos futuros, se espera que la distribución de la especie se vea favorecida, debido a que el cambio climático incrementará las zonas con mayor aptitud ambiental para *G. hirsutum*. Sobre esta conclusión existe coincidencia en los tres MCG utilizados, siendo el modelo MIROC (Medres) el que reporta mayor superficie de muy alta aptitud ambiental.

Models that have lower profit percentage area occupied by category are ECHAM5 in the low category, UKMO\_HADCM3 in middle and high class and MIROC (Medres) in the high category.

In general it can be observed that all models show a trend in which the species expanded their distribution to climate change conditions, extending the States of Sonora, Sinaloa, Tamaulipas and Nuevo León.

It is quite evident that, the impact caused by climate change will benefit the distribution of *G. hirsutum* L., unlike many other species whose geographical distribution is affected by changes in weather patterns (Jarvis, 2008; Villers, 2009; Contreras *et al.*, 2010; Sork *et al.*, 2010). Within the benefit climate change will bring, is the expansion of areas with high and very high environmental suitability, which will cause the appearance of new areas with this level of environmental fitness, particularly in the region consists of the southern and Sonora and northern Sinaloa, the region formed by the boundary area of Tamaulipas and Nuevo León and the Southern Gulf State of Tabasco (Figure 2).

Studies in the southwestern United States show that, the fields for cotton cultivation (*Gossypium* sp.) will increase up to 26-36% of its current condition, if the levels of carbon dioxide continue to increase (Doherty, 2003).

The plant processes that are directly affected by changes in the atmosphere (CO<sub>2</sub> concentration) are mainly photosynthesis, photorespiration, night respiration and transpiration (Fitter, 1987). The temperature increase under future climate change and elevated CO<sub>2</sub> levels that will be beneficial to the productivity of cotton to a certain threshold, where the rate of photosynthesis is less than optimal or environmental stress is high (Reddy *et al.*, 2000).

## Conclusions

For future climate scenarios, it is expected that the distribution of the species will be favoured, because climate change will increase the areas of highest environmental suitability for *G. hirsutum*. On this conclusion there is agreement on the three MCGs used, being the model MIROC (Medres) which reported higher environmental surface high fitness.

Por lo anterior, es importante identificar aquellas zonas que se verán favorecidas o afectadas y comenzar a implementar las estrategias necesarias para asegurar la conservación de la especie como recurso fitogenético.

En cuanto a la producción de algodón a partir de *G. hirsutum*, es muy probable que por el momento no se requieran variedades adicionales a las ya disponibles, pero es un mediano plazo habrá que ir desarrollando estrategias enfocadas en el desarrollo de variedades que fotosinteticen eficientemente a altas temperaturas y en condiciones de baja disponibilidad de humedad en el suelo, con la finalidad de adaptarse ante cualquier escenario climático.

Therefore, it is important to identify those areas that will be enhanced or be affected and begin to implement the necessary measures to ensure the conservation of the species as genetic resources strategies.

As for the cotton production from *G. hirsutum* it is very likely that no additional time is required for the varieties already available, but it is a medium term that will have to develop strategies focused on developing varieties that efficiently go through photosynthesis at high temperatures and under low moisture availability on the soil, in order to adapt to any climate scenario.

## Literatura citada

- Brubaker, C. L. and Wendel, J. F. 1994. Reevaluating the origin of domesticated cotton (*Gossypium hirsutum*, Malvaceae) using nuclear restriction fragment length polymorphisms (RFLPs). *Am. J. Bot.* 81:1039-1326.
- Contreras, R.; Luna, I. y Ríos, C. 2010. Distribución de *Taxus globosa* (Taxaceae) en México: Modelos ecológicos de nicho, efectos del cambio de uso de suelo y conservación. *Revista Chilena de Historia Natural* 83:421-433.
- De la Paz G. S.; Sánchez, G. J. J.; Ruiz, C. J. A.; Ron, P. J.; Miranda, M. R.; De la Cruz L.; Lépiz I. R. 2010. Diversidad de especies insectiles en maíz y teocintle en México. *Folia Entomol. Mex.* 48(2):1-6.
- Doherty, R.; Mearns, L.; Raja, K.; Downton, M.; McDaniel, L. 2003. Spatial scale effects of climate scenarios on simulated cotton production in the southeastern U.S.A. *Climatic Change* 60:99-129.
- Elith, J.; Graham, C.; Anderson, R.; Dudík, M.; Ferrier, S.; Guisan, A.; Hijmans, R.; Huettmann, F.; Leathwick, J.; Lehmann, A.; Li, J.; Lohmann, L.; Loiselle, B.; Manion, G.; Moritz, C.; Nakamura, M.; Nakazawa, Y.; Overton, J.; McPeterson, A.; Phillips, S.; Richardson, K.; Scachetti-Pereira, R.; Schapire, R.; Soberón, J.; Williams, S.; Wisz, M. and Zimmermann, N. 2006. Novel methods to improve prediction of species distributions from occurrence data. *Ecography* 29: 129-151.
- Organization of the United Nations Food and Agriculture Organization (FAO). 2007. Adaptation to climate change in agriculture, forestry and fisheries: Perspective, framework and priorities. FAO Interdepartmental working group on climate change. FAO Electronic Publication. Rome, Italy. 24 p.
- Fitter, A. and Hay, R. 1987. Environmental physiology of plants. 2<sup>nd</sup> Edition. Academic Press, London.
- García, E. 1989. Apuntes de climatología. Offset Larios. México, D. F. 155 p.
- García, F. 2006. La conservación de los recursos fitogenéticos de México. *Revista Ciencia, Universidad Autónoma de Nuevo León*, 10(2):115.
- González, C.; Wang, O.; Strutz, S.; González, C.; Sánchez, V. and Sarkar, S. 2010. Climate Change and risk of Leishmaniasis in North America: predictions from ecological niche models of vector and reservoir species. *PLoS Negl Trop Dis.* 4(1):585.
- Hanley, J. and McNeil, B. 1982. The meaning and use of the area under a receiver operating characteristic (ROC) Curve. *Radiology.* 143(1): 29-36.
- Holdridge, L. R. 1967. Life zone ecology. Tropical science center. San José, Costa Rica.
- Ibarra, M. J. L.; Rangel, P. G.; González, F. F. A.; De Anda, J.; Zamudio, R. M. E.; Martínez, M. E. y Macías, C. H. 2010. Modelo de nicho ecológico para predecir la distribución potencial de fitoplancton en la Presa Hidroeléctrica Aguamilpa, Nayarit, México. *AmbiAgua.* 5(3):60-75.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). 2005. Conjunto de la carta de uso de suelo y vegetación. Continuo Nacional. Serie II. Escala 1: 1 000 000. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. México, D. F.
- 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.
- Iqbal, M. J.; Reddy, O. U. K.; El Zik, K. M. and Pepper, A. E. 2001. A genetic bottleneck in the 'evolution under domestication' of upland cotton *Gossypium hirsutum* L. examined using DNA fingerprinting. *Theoretical and applied genetics.* 103: 547-554.
- Jarvis, A.; Lane, A. and Hijmans, R. 2008. The effect of climate change on crop wild relatives. *Agric. Ecosys. Environ.* 3158:11.
- Jenkins, J. N. 2003. Cotton. *In: traditional crop breeding practices: an historical review to serve as a baseline for assessing the role of modern biotechnology.* OECD. 61.70 pp.
- Lasco, R. D.; Pulhin, F. B.; Sánchez, P. A. J.; Villamor, G. B. and Villegas, K. A. L. 2008. Climate change and forest ecosystems in Philippines: Vulnerability, adaptability and mitigation. *J. Environ. Sci. Managem.* 11(1):1-14.
- López, S. J. L.; Ruiz, C. J. A.; Sánchez, G. J. J. y Lépiz, I. R. 2005. Adaptación climática de 25 especies de frijol silvestre (*Phaseolus* spp.) en la República Mexicana. *Rev. Fitotec. Mex.* 28(3): 221-230.
- McArthur, R. H. 1972. Geographical ecology: patterns in the distribution of species. Harper and Row, New York. 54 p.
- Mittermeier, R. y Goettsch, C. 1992. La importancia de la diversidad biológica de México. México ante los retos de la biodiversidad. Conabio, México. 57-62 pp.

- Morales, S. N. 2012. Modelos de distribución de especies: Software Maxent y sus aplicaciones en conservación. *Revista Conservación Ambiental*. 2(1):1-5.
- Morrone, J. 2005. Hacia una síntesis biogeografía de México. *Rev. Mex. Biod.* Diciembre. 76:2.
- Office of the Gene Technology Regulator (OGTR). 2008. The biology of *Gossypium hirsutum* L. and *Gossypium barbadense* L. (Cotton), versión 2. Department of Health and Ageing, Government of Australia. Australia. 87 p.
- Paredes, G. D. M.; Ramírez, B. A. y Martínez, M. M. A. 2011. Distribución y representatividad de las especies del género *Crotalus* en las áreas naturales protegidas de México. *Rev. Mex. Biod.* 82:689-700.
- Phillips, S. and Dudik, M. 2008. Modeling of species distribution with MaxEnt: new extensions and a comprehensive evaluation. *Ecography*. 31:161-175.
- Reddy, K.; Hodges, H. and Kimball, B. 2000. Crop ecosystem responses to global climate change: cotton. *In*: Reddy, K. R. and Hodges, H. F. (Eds.). *Climate Change and Global Crop Productivity*, Chapter 8, CAB International, UK. 161-187 pp.
- Ruiz, C. J. A.; Durán, P. N.; Sánchez, G. J. J.; Ron, P. J.; González, E. D. R.; Holland, J. B. and Medina, G. G. 2008. Climatic adaptation and ecological descriptors of 42 Mexican maize (*Zea mays* L.) races. *Crop Sci.* 48:1502-1512.
- Ruiz Corral, J. A.; Sánchez, G. J.; de J. Hernández, C. J. M.; Wilcox, M. C.; Ramírez, O. G.; Ramírez, D. J. L. y González, E. D. R. 2013. Identificación de razas de maíz adaptadas a condiciones deficientes de humedad mediante datos biogeográficos. *Rev. Mex. Cienc. Agric.* 4(6):829-842.
- Ruiz, J. A. 1999. Requerimientos agroecológicos de cultivos. Centro de Investigación Regional del Pacífico Centro, INIFAP, SAGAR. 24-26 pp.
- Ruiz, J. A.; Medina, G.; Ramírez, J. L.; Flores, H. E.; Ramírez, G.; Manriquez, J. D.; Zarazúa, P.; González, D. R.; Díaz, G. and de la Mora C. 2011. Climate change and its implications in five producing areas of maize in Mexico. *Rev. Mex. Cienc. Agric.* 2:309-323.
- Schneider, R. R.; Hamann, A.; Farr, D.; Wang, X. and Boutin, S. 2009. Potential effects of climate change on ecosystem distribution in Alberta. *Can J. For. Res.* 39: 1001-1010.
- Sobek, S. S.; Kluza, D. A.; Cuddington, K. and Lyons, D. B. 2012. Potential distribution of emerald ash borer: What can we learn from ecological niche models using Maxent and GARP? *Forest Ecol. Managem.* 281(1):23-31.
- Sork, V.; Davis, F.; Westfall, R.; Flints, A.; Ikegami, M.; Wang, H. and Grivet, D. D. 2010. Gene movements and genetic association with regional gradients in California valley oak (*Quercus lobata* Née) in the face of climate change. *Mol. Ecol.* 19:3806-3823.
- Torres, R. y Jayat, J. 2010. Modelos predictivos de distribución para cuatro especies de mamíferos (*Cingulata*, *Artiodactyla* y *Rodentia*) típicas del Chaco en Argentina. *Mastozoología Neotropical.* 17(2):335-352.
- Villers, L.; Arizpe, N.; Orellana, R.; Conde C. y Hernández, J. 2009. Impactos del cambio climático en la floración y desarrollo del fruto del café en Veracruz, México. *INCI.* 34(5):322-329.
- Walter, H. 1985. *Vegetation of the earth and ecological systems of geobiosphere*, third (Ed.). Springer, Heidelberg.
- 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 prospectivo. Tesis doctoral. Universidad de Guadalajara. Zapopan, Jalisco, México.