

RENDIMIENTOS DE MAÍZ (*Zea mays* L.) EN ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO EN LA REGIÓN DE LA ANTIGUA, VERACRUZ-MÉXICO

MAIZE (*Zea mays* L.) YIELDS UNDER CLIMATE CHANGE SCENARIOS IN THE REGION OF LA ANTIGUA, VERACRUZ, MEXICO

Rafael A. Guajardo-Panes¹, Guadalupe R. Granados-Ramírez², Ignacio Sánchez-Cohen^{3*}, Víctor L. Barradas-Miranda⁴, Juan C. Gómez-Rojas⁵, Gabriel Díaz-Padilla⁶

¹INIFAP. Campo Experimental Cotaxtla. Km. 3.5 Carretera Xalapa-Veracruz. Colonia Ánimas. Xalapa, Veracruz-México. 91190. (guajardo.rafael@inifap.gob.mx). ²UNAM. Instituto de Geografía. Circuito Exterior s/n. Cd. Universitaria. Del. Coyoacán. México, D.F.-México. 04510. (rebeca@igg.unam.mx). ³INIFAP-RASPA. Canal Sacramento Km. 6.5. Zona Industrial 4ta Etapa. Gómez Palacio, Durango-México. 35140. (sanchez.ignacio@inifap.gob.mx). ⁴UNAM. Instituto de Ecología. Circuito Exterior s/n. Cd. Universitaria. Del. Coyoacán. México, D.F.-México. 04510. (vbarrada@ecologia.unam.mx). ⁵UNAM. Colegio de Geografía. Circuito Exterior s/n. Cd. Universitaria. Del. Coyoacán. México, D.F.-México. (jcfilos@gmail.com). ⁶INIFAP. Campo Experimental Cotaxtla. Km. 3.5 Carr. Xalapa-Veracruz. Col. Ánimas. Xalapa, Veracruz-México. 91190. (diaz.gabriel@inifap.gob.mx)

RESUMEN

El cambio climático modificará la producción y la distribución de las especies vegetales, por lo cual deberá considerarse la implementación de planes de adaptación para minimizar sus efectos y la reducción de impactos a la seguridad alimentaria. En este estudio se cuantificó la variación de rendimientos de maíz (*Zea mays* L.) en condiciones de secano en el ciclo primavera-verano bajo escenarios de cambio climático en el periodo de 2011 a 2030, en el Distrito de Desarrollo Rural de La Antigua, Veracruz, México. Las variaciones posibles en la producción de maíz con respecto a las condiciones climáticas actuales se analizaron en áreas con condiciones propicias para el desarrollo de este cultivo. La congruencia lógico-espacial y homogeneidad se verificó con los registros diarios de precipitación y temperatura de 40 estaciones climatológicas del Servicio Meteorológico Nacional. Los datos faltantes se estimaron con ClimGen, series climáticas se generaron en LarsWG, los rendimientos se evaluaron en los escenarios A1B, A2 y B1 en SICTOD y las zonas potencialmente vulnerables se definieron mediante interpolación espacial de rendimientos. Los rendimientos de maíz en el DDR La Antigua, para cada escenario de cambio climático, fueron diferentes que los actuales ($p=0.066$); en el ámbito espacial podrían afectar 7 % de la superficie con condiciones para la producción de maíz en el escenario B1. En los escenarios A1B y A2 se afectaría

ABSTRACT

Climate change will modify the production and distribution of plant species, which is why implementing adaptation plans to minimize its effects, as well as to reduce impacts on food security, should be considered. This study assessed the variation of maize (*Zea mays* L.) yields under rainfed conditions under climate change scenarios, for the spring-summer cycle in the period of 2011 to 2030, in the Rural Development District of La Antigua, Veracruz, Mexico. The possible variations in maize production concerning current climate conditions were analyzed in areas with favorable conditions for the development of this crop. The logical-spatial coherence and homogeneity were verified with daily records of precipitation and temperature from 40 climatological stations of the National Meteorological Service. Missing data were estimated with ClimGen, climate series were generated with Lars WG, crop yields were evaluated for scenarios A1B, A2 and B1 using a water balance simulation model (SICTOD), and the potentially vulnerable zones were defined through spatial interpolation of yields. Maize yields in the RDD La Antigua for each climate change scenario were different from the present ones ($p=0.666$); in the spatial scope, they could affect 7 % of the surface with conditions for maize production under scenario B1. Under the scenarios A1B and A2, 94 % of the surfaces with conditions for maize production would be affected. Yields can be maintained, but they could come to vary in space. The information can be used to develop projects of climate change adaptation, with the participation of agricultural producers, climate change

* Autor responsable ♦ Author for correspondence.

Recibido: enero, 2017. Aprobado: agosto, 2017.

Publicado como ARTÍCULO en *Agrociencia* 52: 725-739. 2018.

94 % de las superficies con condiciones para la producción de maíz. Los rendimientos pueden mantenerse, pero podrán llegar a variar en el espacio. La información puede utilizarse para desarrollar proyectos de adaptación al cambio climático, con la participación de productores agrícolas, gestores en cambio climático, u otros, con acciones, como la sustitución de cultivos y variedades nuevas, y recalendarizar las labores agrícolas.

Palabras clave: rendimientos, riesgo agrícola, cambio climático, maíz, Distrito de Desarrollo Rural La Antigua.

INTRODUCCIÓN

La producción agrícola está determinada por factores del medio físico, como relieve, suelo y clima; en este último se incluyen factores como temperatura y precipitación, que pueden ser determinantes en los rendimientos, principalmente en eventos extremos y atípicos (Ojeda-Bustamante *et al.*, 2011). El impacto simultáneo de la variabilidad natural del clima y el cambio climático en la actividad agrícola es un riesgo en la seguridad alimentaria (Velasco *et al.*, 2015). Ahora se reconoce la amenaza de los cambios en el clima, por los impactos que pueden generar en la producción agrícola y su condicionamiento por la duración, frecuencia e intensidad de eventos de lluvia y temperatura extrema. Lo anterior muestra la necesidad de reevaluar la capacidad de adaptación de los sistemas productivos y su efecto en secuencia en los sectores económico y social (Wreford *et al.*, 2010). Los efectos del cambio climático serán diversos entre las regiones del planeta (Conde *et al.*, 2004), pero afectarán negativamente y la gravedad de los efectos dependerá de las medidas de mitigación y adaptación.

En la agricultura de secano, la precipitación, entre otras variables en el ciclo primavera-verano define el régimen de humedad del suelo y la evapotranspiración de los cultivos (Allen *et al.*, 2006) y la productividad de los cultivos (Dirmeyer *et al.*, 2009). Además, la temperatura influye en el desarrollo de cualquier cultivo y especie vegetal; la mayoría puede subsistir entre 0 y 32 °C, aunque cada una de ellas tienen requerimientos específicos para su crecimiento y desarrollo; los cuales definen los umbrales termoplumiométricos de las plantas. Estos umbrales térmicos incluyen las temperaturas mínimas, máximas y óptimas para el desarrollo. Cada etapa fenológica tiene

managers, or others, with actions like crop substitution and new varieties, and to reprogram agricultural tasks.

Key words: yields, agricultural risk, climate change, maize, Rural Development District La Antigua.

INTRODUCTION

Agricultural production is defined by factors of the physical environment, such as relief, soil and climate; in the latter, factors like temperature and precipitation are included, which can be defining in the yields, primarily in extreme and atypical events (Ojeda-Bustamante *et al.*, 2011). The simultaneous impact of the natural variability of climate and climate change on agricultural activity is a risk to food security (Velasco *et al.*, 2015). The threat of changes in climate is now recognized, from the impacts that agricultural production can generate and conditioning from the duration, frequency and intensity of rain and extreme temperature events. This shows the need to reevaluate the adaptation capacity of productive systems and their effect in sequence on the economic and social sectors (Wreford *et al.*, 2010). The effects of climate change will be diverse between regions of the planet (Conde *et al.*, 2004), but they will affect negatively and the seriousness of the effects will depend on the measures taken for mitigation and adaptation.

In dryland agriculture, the precipitation, among other variables in the spring-summer cycle, defines the soil moisture regime and the evapotranspiration of crops (Allen *et al.*, 2006) as well as their productivity (Dirmeyer *et al.*, 2009). In addition, the temperature influences the development of any crop and plant species; most can subsist between 0 and 32 °C, although each has specific requirements for their growth and development, which define the thermo-pluviometric thresholds of the plants. These thermal thresholds include the minimum, maximum and optimal temperatures for development. Each phenological stage has its own requirements of temperature and humidity; in the case of the optimal temperature for seed germination, it is frequently lower than the optimal temperature for vegetative development (Ortiz, 1984). This leads to evaluate the optimal hydric conditions of the crops, which may be through the soil water balance and taking into consideration the distribution, variability and

requerimientos propios de temperatura y humedad; es el caso de la temperatura óptima para la germinación de las semillas, que con frecuencia es menor que la temperatura óptima para el desarrollo vegetativo (Ortiz, 1984). Lo anterior conduce a evaluar las condiciones hídricas óptimas de los cultivos, que puede ser mediante el balance hídrico y considerando distribución, variabilidad y cambios de la precipitación y efecto de la temperatura, que se refleja en la evapotranspiración y las características físicas del suelo (Pántano *et al.*, 2014). El manejo de agua, basado en pronósticos o escenarios de clima, permite mantener la seguridad económica, social y alimentaria del país.

En la agricultura mexicana las superficies cultivadas sufren los efectos de eventos meteorológicos adversos como las sequías. En 2012 se presentó la peor sequía en siete décadas, generó pérdidas por nueve mil millones de pesos en cultivos de maíz (Reuters, 2012). En 2011, en el norte del país se afectaron al menos un millón de hectáreas, principalmente con cultivos como maíz, frijol, trigo, sorgo, papa, hortalizas y cítricos; esto generó pérdidas por más de 45 mil millones de pesos (El Financiero, 2011). Los eventos climatológicos extremos también afectan la capacidad productiva y la pérdida de empleos en áreas rurales. La Ley de Desarrollo Rural Sustentable mexicana publicada en el Diario Oficial de la Federación (2001), establece que el maíz es un producto básico y estratégico para la seguridad alimentaria. De acuerdo con el Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP, 2015), en 2014 en México el maíz en grano se sembró en 5.7 millones de ha de secano en el ciclo primavera-verano (PV). Los estados de Chiapas y Jalisco concentran 10.3 y 8.8 % de la superficie sembrada. Los estados con pérdidas mayores de este cultivo fueron Tamaulipas, Quintana Roo y San Luis Potosí, con 41, 33 y 22 % de superficie siniestrada reportada. Las causas de la siniestralidad de los cultivos en esos estados se desconocen, pero se adjudican a las sequías en el norte y lluvias excesivas en el sureste del país. Por lo anterior la hipótesis del estudio fue que los cambios de patrones climáticos representados por los escenarios A1B, A2 y B1 del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC) afectarán el rendimiento del cultivo maíz en la región de estudio. El objetivo de este estudio fue identificar y cuantificar los cambios en los rendimientos de maíz en las zonas potenciales de secano, en el ciclo PV, en los escenarios de cambio climático A1B, A2 y B1, de 2011 a 2030 en el Distrito de Desarrollo Rural (DDR) de

changes of precipitation and the effect of temperature, which are reflected in the evapotranspiration and physical characteristics of the soil (Pántano *et al.*, 2014). Water management, based on predictions or climate scenarios, allows maintaining the economic, social and food security of the country.

In Mexico, agricultural planted areas suffer the effects of adverse meteorological events such as drought. In 2012, the worst drought in seven decades took place, generating losses of nine thousand million pesos in maize crops (Reuters, 2012). In 2011, in the north of the country at least one million hectares were affected, primarily with crops such as maize, bean, wheat, sorghum, potato, vegetables and citrus trees; and losses were over 45 thousand million pesos (El Financiero, 2011). Extreme climatological events also affect the productive capacity and the loss of employment in rural areas.

The Mexican Sustainable Rural Development Law, published in the Official Journal of the Federation (2001), establishes that maize is a basic and strategic product for food security. According to the Service of Agrifood and Fishing Information (*Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera*, SIAP, 2015), in 2014 grain maize was sown in Mexico on 5.7 million dryland hectares in the spring-summer (SS) cycle. The states of Chiapas and Jalisco concentrate 10.3 and 8.8 % of the surface sown. The states with highest losses of this crop were Tamaulipas, Quintana Roo and San Luis Potosí, with 41, 33 and 22 % of surface damaged, respectively. The causes for crop damages in these states are unknown, but they are attributed to droughts in the north and excessive rains in the southeast of the country. Therefore, the hypothesis of this study was that changes in climate patterns represented by scenarios A1B, A2 and B1 of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) will affect the yield of maize crop in the study region. The objective of this study was to identify and assess the changes in maize crop yields in potential rainfed areas, since 2011 and projected through 2030, in the Rural Development District (RDD) of La Antigua, Veracruz, Mexico, under climate change scenarios A1B, A2 and B; and to verify whether there is the possibility of changing these scenarios.

MATERIALS AND METHODS

The RDD of La Antigua, Veracruz (19° 09' and 19° 57' N and 93° 13' and 96° 47' W) (Gobierno del estado de Veracruz,

la Antigua, Veracruz, México, y verificar si existe la posibilidad de cambios en esos escenarios.

MATERIALES Y MÉTODOS

El DDR de La Antigua, Veracruz (19° 0' y 19° 57' N y 93° 13' y 96° 47' O) (Gobierno del estado de Veracruz, 2009; INEGI, 2014) está conformado por los municipios de Actopan, Alto Lucero de Gutiérrez Barrios, La Antigua, Paso de Ovejas, Úrsulo Galván y Puente Nacional. El área de influencia generada fue 20 km, en relación con el límite político del DDR, para contar con estaciones de apoyo. Las estaciones meteorológicas seleccionadas son administradas por el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) y la información se obtuvo con la aplicación desarrollada para Google Earth (CONAGUA-SMN, 2014), con la aplicación se despliegan más de 5000 estaciones climatológicas de las cuales 3,200 se encuentran en operación (CNA-SMN, 2010). La información se extrajo en formato "kmz" y se exportó a formato "shape" para facilitar su manejo en Sistemas de Información Geográfica (SIG). Mediante revisión y las pruebas de homogeneidad normal estándar (SNHT), Pettitt y Buishand (Hainie y Mohd, 2013) se constató que la información de las estaciones fuera suficiente, integra, coherente y homogénea. Las variables empleadas fueron registros diarios de temperatura máxima (Tmax), temperatura mínima (Tmin), y precipitación (Pp) de 40 estaciones climatológicas de CONAGUA. Las características fueron: 1) contar con al menos 25 años de información, 2) no tener más de 20 % de información faltante en su registro histórico, y 3) tener información anterior al 2000. Además, la congruencia espacial de la información se verificó mediante la implementación de rutinas desarrolladas en Visual Basic y almacenadas en macros de Excel, para detectar registros atípicos o fuera de tipo como: Pp negativas, Tmax menores a Tmin, Tmin mayores a Tmax, y registros en fechas inválidas (años bisiestos). Un proceso de validación espacial se basó en la norma UNE 500540: 2004 (UNE, 2004) y descripción de Estévez y Gavilán (2008). El método consistió en calcular intervalos de confianza para cada variable climática, de cada estación. Cinco estaciones vecinas, ubicadas en el mismo estrato climático, se identificaron a menos de 20 km de distancia; cada registro de Tmax, Tmin y Pp de estas estaciones se cotejó con los intervalos de confianza y el registro que no incidió en el intervalo y no cumplió con los criterios ya descritos se consideraron datos faltantes.

La versión de prueba del programa XLSTAT (Addinsoft, 2014) se empleó para verificar el supuesto de homogeneidad de Tmax, Tmin y Pp, mediante Homogeneidad Normal Estándar (SNHT), Pettitt y Buishand. Esto permitió clasificar tres grupos en un concentrado de estaciones (Schonwiese y Rapp, 1997; Wijngaard *et al.*, 2003): estaciones con información confiable,

2009; INEGI, 2014), is made up of the municipalities of Actopan, Alto Lucero de Gutiérrez Barrios, La Antigua, Paso de Ovejas, Úrsulo Galván and Puente Nacional. The area of influence generated was 20 km, in relation to the political limit of the RDD, to have support stations. The meteorological stations selected are managed by the National Meteorological Service (*Servicio Meteorológico Nacional*, SMN), and the information was obtained with the application developed for Google Earth (CONAGUA-SMN, 2014); more than 5000 climatologic stations are displayed with the application, of which 3,200 are in operation (CNA-SMN, 2010). The information was extracted in "kmz" format and exported to "shape" format to ease its management in Geographic Information Systems (GIS).

Through review and standard normal homogeneity tests (SNHT), Pettitt and Buishand (Hainie and Mohd, 2013), it was found that the information from the stations was enough, complete, coherent and homogeneous. The variables used were daily records of maximum temperature (Tmax), minimum temperature (Tmin), and precipitation (Pp) from 40 CONAGUA climate stations. The characteristics were: 1) having at least 25 years of information, 2) not having more than 20 % of the information missing from its historical record, and 3) having information prior to the year 2000. In addition, the spatial coherence of the information was verified through the implementation of routines developed in Visual Basic and stored in Excel macros, to detect atypical or out-of-the-ordinary records, such as: negative Pp, Tmax lower than Tmin, Tmin higher than Tmax, and records on invalid dates (leap years). Estévez and Gavilán (2008) based a process of spatial validation on the norm UNE 500540: 2004 (UNE, 2004) and description. The method consisted in calculating confidence intervals for each climate variable, from each station. Five neighboring stations, located in the same climate stratum, were identified at less than 20 km of distance; each record of Tmax, Tmin and Pp from these stations was checked against the confidence intervals and the record that did not influence the interval and did not fulfill the criteria already described were considered missing data.

The trial version of the XLSTAT program (Addinsoft, 2014) was used to verify the assumption of homogeneity of Tmax, Tmin and Pp, through Normal Standard Homogeneity (SNHT), Pettitt and Buishand. This allowed classifying into three groups in a concentrate of stations (Schonwiese and Rapp, 1997; Wijngaard *et al.*, 2003): stations with reliable, semi-reliable and unreliable information. The first two were used in the study.

The missing data were estimated with the ClimGen software (Stöckle and Nelson, 2014) and included rainfall, temperature, solar radiation, among others. The software is of free access and requires daily climate information to calculate the parameters needed for data generation. This software is used to establish

semi-confiable y no confiable. Las dos primeras se utilizaron en el estudio. Los datos faltantes se estimaron con el software ClimGen (Stöckle y Nelson, 2014) e incluyeron precipitación pluvial, temperatura, radiación solar, entre otras. El programa es de acceso libre y requiere de información climática diaria para calcular los parámetros requeridos para la generación de datos. Este programa se ha empleado para conformar las normales climatológicas en algunos estados de país (Díaz *et al.*, 2006) y para estudiar la variación espacio temporal de la precipitación pluvial (Díaz *et al.*, 2011). Los datos de precipitación generados se basan en dos supuestos (Carbajal *et al.*, 2010), la condición de precipitación pluvial de un día (*i*) está relacionada con la condición de precipitación del día anterior (*i*-1), este supuesto se conoce como modelo de cadena de Markov, en el que $P(W/W)$ es la probabilidad condicional de que llueva en un día *i* dado que el día anterior (*i*-1) llovió y $P(W/D)$ es la probabilidad de que un día *i* llovió dado que el día anterior (*i*-1) no llovió, entonces se define que $P(D/W)=1-P(W/W)$ es la probabilidad de un día *i* si llueva dado que el día anterior (*i* - 1) llovió y $P(D/D)=1-P(W/D)$ es la probabilidad de que un día no llueva dado que el día anterior (*i*-1) no llovió (Stöckle y Nelson 2014). ClimGen requiere al menos 25 años de información de precipitación y 10 años de temperatura mínima y máxima para estimar información faltante.

Los escenarios de emisión de CO₂ considerados en este proceso (Cuadro 1) fueron los propuestos por el IPCC en su cuarto comunicado (IPCC, 2000):

En la estimación de datos climáticos actuales y de futuro inmediato (2011 a 2030), para los escenarios A1B, A2 y B1 (Suessun, 2012), se empleó el programa LarsWG (Semenov y Barrow, 2002). Este incluye escenarios basados en 15 modelos climáticos globales empleados en el Cuarto Informe de Evaluación del IPCC (IPCC, 2008). A partir de las 40 bases de datos originales de Tmax, Tmin y Pp, se estimaron los datos faltantes y para el escenario actual se generaron series climáticas para cada

the climate normal in some states of the country (Díaz *et al.*, 2006) and to study the space-time variation of rainfall spells (Díaz *et al.*, 2011). The precipitation data generated are based on two assumptions (Carbajal *et al.*, 2010): the condition of rain precipitation in a day (*i*) is related to the condition of precipitation of the previous day (*i*-1); this assumption is known as Markov's chain model, where $P(W/W)$ is the conditional probability that it will rain on day *i* given that the previous day (*i*-1) it rained and $P(W/D)$ is the probability that it rained on day *i* given that the previous day it didn't rain (*i*-1). Therefore, $P(D/W)=1-P(W/W)$ is defined as the probability that day *i* it will rain given that the previous day it did rain (*i*-1) and $P(D/D)=1-P(W/D)$ is the probability that one day it will not rain given that on the previous day (*i*-1) it did not rain (Stöckle and Nelson 2014). ClimGen requires at least 25 years of information on precipitation and 10 years of minimum and maximum temperature to estimate missing information.

The scenarios for CO₂ emission considered in this process (Table 1) were the ones proposed by the IPCC in its fourth statement (IPCC, 2000):

In the estimation of current climate data and of the immediate future (2011 to 2030), for scenarios A1B, A2 and B1 (Suessun, 2012), the LarsWG software was used (Semenov and Barrow, 2002). This includes scenarios based on 15 global climate models used in the IPCC's Fourth Evaluation Report (IPCC, 2008). From the 40 original databases of Tmax, Tmin and Pp, the missing data were estimated and for the current scenario, climate series were generated for each climate scenario based on the information from the same 40 stations. Thus, the total was 160 databases with complete information of Tmax, Tmin and Pp. Descriptive statistics and transition matrixes only of the Pp variable were applied to these variables.

To quantify the impact, the SICTOD computer software, developed by Sánchez *et al.* (2015), was used. This software quantifies the variables of moisture balance in the soil from

Cuadro 1. Descripción de escenarios de cambio climático de acuerdo al cuarto comunicado del IPCC.
Table 1. Description of climate change scenarios based on IPCC's fourth assessment.

	A1B	A2	B1
Crecimiento de la población	Bajo	Alto	Bajo
Crecimiento económico	Muy alto	Medio	Alto
Uso de energía	Muy alto	Alto	Alto
El ritmo en los cambios de la tecnología	Rápido	Lento	Medio
Cambios tecnológicos favorables	Opciones energéticas balanceadas	Varía por región	Recursos limpios y eficientes
Conciencia ambiental	Bajo	Varía por región	Alto
Enfoque de equidad social	Bajo	Varía por región	Alto
Escala	Global	Local / Regional	Global

escenario climático, con base en la información de las mismas 40 estaciones. Así, el total fue de 160 bases de datos con información completa de Tmax, Tmin y Pp. A estas variables se les aplicó estadísticas descriptivas y matrices de transición solo de la variable Pp.

Para cuantificar el impacto se utilizó el programa computacional SICTOD, desarrollado por Sánchez *et al.* (2015). Este programa cuantifica las variables de balance de humedad en el suelo a partir de la información diaria de los registros históricos, el cultivo de interés, las características del suelo de la zona agrícola, la fecha de siembra y la longitud del periodo de crecimiento del cultivo (Sánchez, 2013). El balance diario se realizó con la humedad antecedente o inicial en el suelo (ΔS) en un punto de control, e inclusión al sistema de: precipitación (Pp), escurrimiento (Q), ascenso capilar (δ) y descuento de las pérdidas por evapotranspiración (Et), percolación profunda (Z) y escurrimiento fuera del área de cultivo (Q_0) (Sánchez, 1994 y De Santa O. *et al.*, 2005). Este balance se resume en la ecuación siguiente.

$$\Delta S_i = \Delta S_{i-1} + [Pp + Q + \delta]_i - [Et + Q_0 + Z]_i \quad (1)$$

Con esta información se realizó la estimación de rendimientos con base en el déficit evapotranspirativo. Este se estimó con la información de precipitación de cada una de las 40 estaciones en los escenarios de cambio climático, refiriendo el rendimiento máximo esperado, según el historial, en condiciones de secano ideales para el cultivo. La información se incluyó en hojas de cálculo para incorporar a SIG.

La georreferenciación de las tablas de rendimientos, en el sistema de coordenadas geográficas y el datum WGS84, se hizo con el software ArcMap (ESRI, 2011). La interpolación espacial de los rendimientos actuales y los asociados a cada escenario de cambio climático se realizó con el método Inverso de la Distancia (IDW). Este método es importante por la aplicación en un SIG y porque pondera por distancia. Dicha ponderación, al tener un factor cuadrático, recibe una influencia bastante fuerte del valor pluvial de las estaciones más cercanas y al considerar una serie o variedad de puntos de estimación puede formar agrupaciones concéntricas de los montos estimados en torno a las estaciones (Pizarro *et al.*, 2003). La fórmula general para realizar el proceso de interpolación es:

$$p_e = \sum_{i=1}^N w_i p_i \quad (2)$$

donde p_e : estimación del valor en el punto i ; p_i : valor observado en la estación i ; w_i : es el peso asignado a la estación i ; y N : es el número total de estaciones cercanas al punto e . El peso (w) se calcula como:

the daily information of historical records, crop of interest, soil characteristics in the agricultural zone, date of sowing, and length of the crop's growing period (Sánchez, 2013). The daily balance was carried out with the initial or antecedent moisture in the soil (ΔS_i) in a control point, and inclusion in the system of: precipitation (Pp_i), runoff (Q_i), capillary action (δ_i) and deduction from loss by evapotranspiration (Et), deep percolation (Z) and runoff outside the cropped area (Q_0) (Sánchez, 1994 and De Santa O. *et al.*, 2005). This balance is summarized in the following equation.

$$\Delta S_i = \Delta S_{i-1} + [Pp + Q + \delta]_i - [Et + Q_0 + Z]_i \quad (1)$$

With this information, yields based on the evapotranspiration deficit were estimated. The evapotranspiration was estimated with the precipitation information from each of the 40 stations in the climate change scenarios, showing the maximum yield expected, according to the history, under ideal rainfed conditions for the crop. The information was included in worksheets to incorporate into GIS.

Georeferencing of the yield tables, in the system of geographic coordinates and datum WGS84, was done with the ArcMap software (ESRI, 2011). The spatial interpolation of current yields and those associated to each climate change scenario was performed with the Inverse Distance method (IDW). This method is important because of its application in the GIS and because it weighs by distance. This weighing, when having a quadratic factor, receives a rather strong influence from the rain value of the nearest stations and when considering a series or variety of estimation points it can form concentric grouping of the amounts estimated around the stations (Pizarro *et al.*, 2003). The general formula to perform the interpolation process is:

$$p_e = \sum_{i=1}^N w_i p_i \quad (2)$$

where p_e : value estimation in point i ; p_i : value observed in the station i ; w_i : weight assigned to the station i ; and N : total number of stations near point e . The weight (w_i) is calculated as:

$$w_i = \frac{N \left(\frac{1}{d_{e,i}} \right)^\beta}{\sum_{i=1}^N \left(\frac{1}{d_{e,i}} \right)^\beta} \quad (3)$$

where β : coefficient of potency, and $d_{e,i}$: distance between the site to be estimated e and the station i .

$$w_i = \frac{N \left(\frac{1}{d_{e,i}} \right)^\beta}{\sum_{i=1}^N \left(\frac{1}{d_{e,i}} \right)^\beta} \quad (3)$$

donde β : coeficiente de potencia, y $d_{e,i}$: distancia entre el sitio a estimar e y la estación i .

El cálculo de la diferencia entre la capa de rendimientos actuales y las capas de los rendimientos bajo condiciones de cambio climático se realizó con proceso de algebra de mapas. Como resultado se obtuvieron tres capas que expresaron la tendencia de rendimientos en escenarios de cambio climático; los valores positivos indicaron disminución de rendimientos y los negativos aumento de rendimientos. Estos valores se reclasificaron para identificar en los mapas los patrones de cambio; a los valores negativos se les asignó la etiqueta “incremento”, a los valores positivos se les asignó la etiqueta “decremento” y a los valores 0 se les asignó la etiqueta “sin cambio”. Mediante ANDEVA se determinó si existían diferencias significativas entre los rendimientos en el escenario actual y los escenarios de cambio climático, con un diseño completo al azar.

Los patrones espaciales en el cambio de rendimientos se delimitaron con base en las áreas potenciales para la producción de maíz delimitadas por Díaz *et al.* (2012), mediante la delimitación de condiciones favorables de precipitación, temperatura, suelos y topografía. El grado de afectación de dichas áreas se determinó en condiciones de cambio climático.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

De las 40 estaciones climatológicas, 32 cumplieron las condiciones de información mínima necesaria y 28 de éstas, de acuerdo con los resultados de pruebas de homogeneidad, mostraron información válida para el estudio. Con $\alpha=0.10$ hubo diferencias significativas entre los rendimientos actuales y los estimados en los escenarios de cambio climático ($p=0.066$). Las pruebas de comparación múltiple mostraron que los rendimientos del escenario A1B ($p=0.019$) y A2 ($p=0.082$) serán significativamente inferiores al resto de los escenarios. La prueba de Tukey ($\alpha=0.10$) indicó que los rendimientos del escenario A1B podrían ser significativamente menores que el resto ($p=0.065$) (Figura 1).

En condiciones favorables de secano, en el escenario actual, para el desarrollo de maíz en el DDR de La Antigua y manejo adecuado de los rendimientos

Calculating the difference between the layer of current yields and the layers of yields under conditions of climate change was carried out with a map algebra process. As a result, three layers were obtained that express the trend of yields under climate change scenarios; the positive values indicated a decrease in yields and the negative ones an increase. These values are reclassified to identify patterns of change on the maps; the negative values were assigned patterns of change on the maps; the negative values were assigned the label “increase”, the positive values were assigned the label “decrease”, and the values 0 were assigned the label “without change”. Through ANDEVA it was determined whether there were significant differences between yields under the present scenario and the climate change scenarios, with a completely random design.

The spatial patterns in the change of yields were defined based on the potential areas for maize production established by Díaz *et al.* (2012), through the delimitation of favorable conditions of precipitation, temperature, soils and topography. The degree of affectation of these areas was determined under conditions of climate change.

RESULTS AND DISCUSSION

Out of the 40 climatological stations, 32 fulfilled the conditions of minimum information necessary and 28 of these, according to results from homogeneity tests, showed valid information for the study. With $\alpha=0.10$ there were significant differences between the current yields and those estimated under the climate change scenarios ($p=0.066$). The multiple comparison tests showed that the yields from scenario A1B ($p=0.019$) and A2 ($p=0.082$) would be significantly lower than the rest of the scenarios. The Tukey tests ($\alpha=0.10$) indicated that the yields from scenario A1B could be significantly lower than the rest ($p=0.065$) (Figure 1).

Under favorable rainfed conditions, in the current scenario, for maize development in the RDD of La Antigua and adequate management, the yields could be 3.5 to 4.0 t ha⁻¹. Under A1B climate change conditions the yields can vary between 3.0 and 3.7 t ha⁻¹, and would represent a decrease of 10 to 14 %. The effects in scenarios B1 and A2 could lead to the production of 3.4 to 3.9 t ha⁻¹ and 3.1 to 3.8 t ha⁻¹, with a decrease of 5 and 5.7 %, lower than in scenario B1 (7.5 and 11 % less for scenario A2) (Figure 2). These values are lower than those estimated by Conde *et al.* (2000) for Coatepec, with the model GFDL-R30, which indicated -30.68 % with the CO₂ effect and -26.86 % without it. The

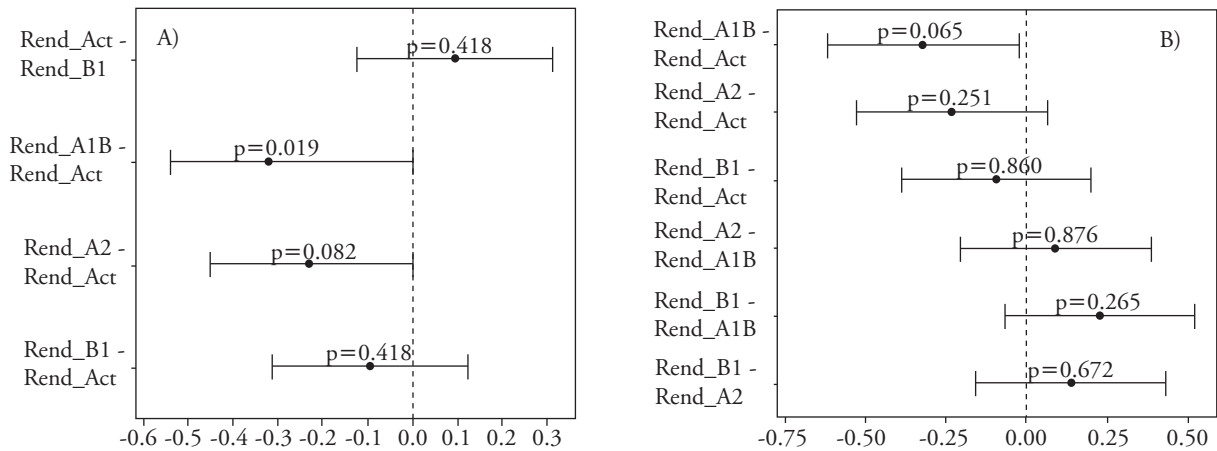


Figura 1. Intervalos de confianza simultáneos de mínima diferencia significativa (A) y de Tukey (B) para los rendimientos actuales y en escenarios de cambio climático.

Figure 1. Simultaneous confidence intervals of minimum significant difference (A) and Tukey (B) for current yields and under climate change scenarios.

podrían ser de 3.5 a 4.0 t ha⁻¹. En condiciones de cambio climático A1B los rendimientos pueden variar entre 3.0 y 3.7 t ha⁻¹, y representarían disminución entre 10 y 14 %. El efecto en los escenarios B1 y A2 podría conducir a producción de 3.4 a 3.9 t ha⁻¹ y 3.1 a 3.8 t ha⁻¹, con disminución de 5 y 5.7 %, menor que en el escenario B1 (7.5 y 11 % menos para el escenario A2) (Figura 2). Estos valores son menores a los estimados por Conde *et al.* (2000) para Coatepec, con los modelo GFDL-R30, ellos indicaron -30.68 % con efecto de CO₂ y -26.86 % sin él. La información en los diferentes escenarios de cambio climático mostró que la variación de rendimientos se debe al efecto combinado de la estacionalidad de la precipitación y la temperatura, y a que el cambio climático puede mostrar comportamientos diferentes en zonas de trópico húmedo, respecto a otras zonas.

El escenario B1 en el DDR La Antigua mostró que 93 % de la superficie cultivada tiene potencial productivo alto; pero, podría reducirse un poco el rendimiento. El mismo comportamiento esperaría en el escenario A1B, pues de las 16,918 ha con potencial productivo alto, 94 % presentará reducción. En el mismo escenario, de las 78,343 ha con potencial productivo medio, 88 % de las superficies podría presentar disminución de rendimientos (Cuadro 2).

En Alto Lucero de Gutiérrez Barrios 95 % de la superficie con potencial productivo alto y 64 % de las superficies con potencial productivo medio podrá presentar impacto menor en el rendimiento por efecto

information in different climate change scenarios showed that the variation in yields is due to the combined effect of seasonality of precipitation and temperature, and because climate change can show different behaviors in zones of the humid tropics, compared to other zones.

The B1 scenario in the RDD La Antigua showed that 93 % of the surface cultivated has high productive potential; however, the yield could

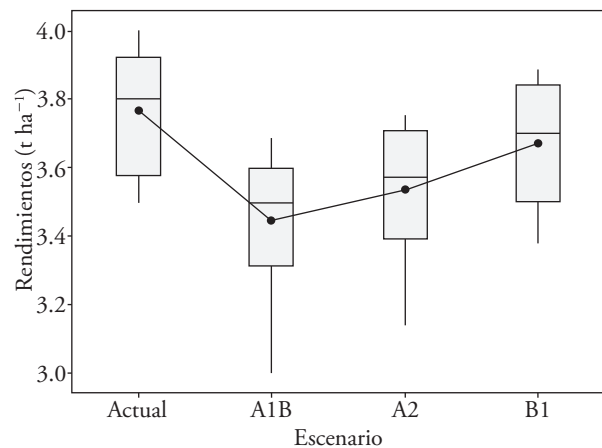


Figura 2. Variación promedio de rendimientos de maíz a través de los diferentes escenarios de cambio climático en el DDR La Antigua, Veracruz, México.

Figure 2. Average variation of maize yields through the different climate change scenarios in the RDD La Antigua, Veracruz, Mexico.

Cuadro 2. Superficies de potencial productivo de maíz afectadas en diferentes escenarios de cambio climático en el DDR La Antigua, Veracruz, México.
Table 2. Surfaces of productive potential of maize affected under different climate change scenarios in the RDD La Antigua, Veracruz, Mexico.

Escenario	Potencial productivo		Tendencia de rendimientos	Superficie afectada por condiciones de cambio climático		Disminución de rendimientos (kg ha ⁻¹)
	Actual	ha		ha	%	
A1B	Alto	16,918	↓	15,963	94	154.35 - 154.75
	Medio	78,343	↓	69,040	88	361.54 - 361.68
A2	Alto	16,918	↓	15,963	94	113.74 - 114.01
	Medio	78,343	↓	73,229	93	260.05 - 260.90
B1	Alto	16,918	=	15,780	93	12.80 - 12.91
	Medio	78,343	↓	182	1	62.68 - 62.98
				59,228	76	104.27 - 104.74

de cambio climático en el escenario B1. El mismo patrón puede esperarse en los municipios de Puente Nacional y Actopan, donde la disminución podría ser hasta 3.29 kg ha⁻¹ en el 96 y 91 % de las superficies con potencial productivo alto. Estas variaciones pueden presentarse en las áreas agrícolas de las zonas de montaña (Figura 3).

En contraste, el municipio de La Antigua podría afectarse por cualquiera de los tres escenarios, y 100 % de la superficie con potencial productivo medio presentaría reducción de 168, 571 y 416 kg ha⁻¹ en el escenario B1, A1B y A2. Otros municipios con potencial productivo medio que se podrían afectar son Paso de Ovejas, con disminución de rendimientos de 277 a 384 kg ha⁻¹, en las 21,391 ha en los escenarios A1B y A2; en Úrsulo Galván disminuiría de 306 a 431 kg ha⁻¹ (94 %) (7,702 ha) en superficies con potencial productivo medio; en Puente Nacional la disminución sería entre 226 y 298 kg ha⁻¹ en 96 % de la superficie con potencial productivo medio (18,299 ha) en los escenarios A1B y A2; en Actopan serían 19,126 ha (90 %) con potencial productivo medio, con disminución entre 199 y 287 kg ha⁻¹ en los escenarios A1B y A2 (Cuadro 3).

La respuesta de los cultivos a cambios en patrones del clima obedece a un efecto combinado de precipitación y temperatura que modifica la respuesta fisiológica del cultivo. El incremento en temperatura, vinculado al estrés hídrico, provoca cierre estomatal; esto disminuye la tasa de intercambio gaseoso y afecta el rendimiento. El exceso de precipitación puede disminuir la oxigenación en el suelo y la tasa de absorción de agua y nutrientes por el cultivo.

be reduced slightly. The same behavior would be expected in scenario A1B, since out of the 16,918 ha with productive potential, 94 % will present reduction. In the same scenario, of the 78,343 ha with medium productive potential, 88 % of the surfaces could present a decrease in yields (Table 2).

In Alto Lucero de Gutiérrez Barrios, 95 % of the surface with high productive potential and 64 % of the surfaces with medium productive potential could present a lower impact on the yield from the effect of climate change in the B1 scenario. The same pattern can be expected in the municipalities of Puente Nacional and Actopan, where the decrease could be of up to 3.29 kg ha⁻¹ in 96 and 91 % of the surfaces with high productive potential. These variations can be present in agricultural areas of the mountainous zones (Figure 3).

In contrast, the municipality of La Antigua could be affected by any of the three scenarios, and 100 % of the surface with medium productive potential would present a reduction of 168, 571 and 416 kg ha⁻¹ in scenarios B1, A1B and A2. Other municipalities with medium productive potential that could be affected are Paso de Ovejas, with a decrease in yields of 277 to 384 kg ha⁻¹, in the 21,391 ha under scenarios A1B and A2; in Úrsulo Galván it would decrease from 306 to 431 kg ha⁻¹ (94 %) (7,702 ha) in surfaces with medium productive potential; in Puente Nacional the decrease would be between 226 and 298 kg ha⁻¹ in 96 % of the surface with medium productive potential (18,299 ha) in scenarios A1B and A2; in Actopan they would be 19,126 ha (90 %) with medium productive potential, with a decrease

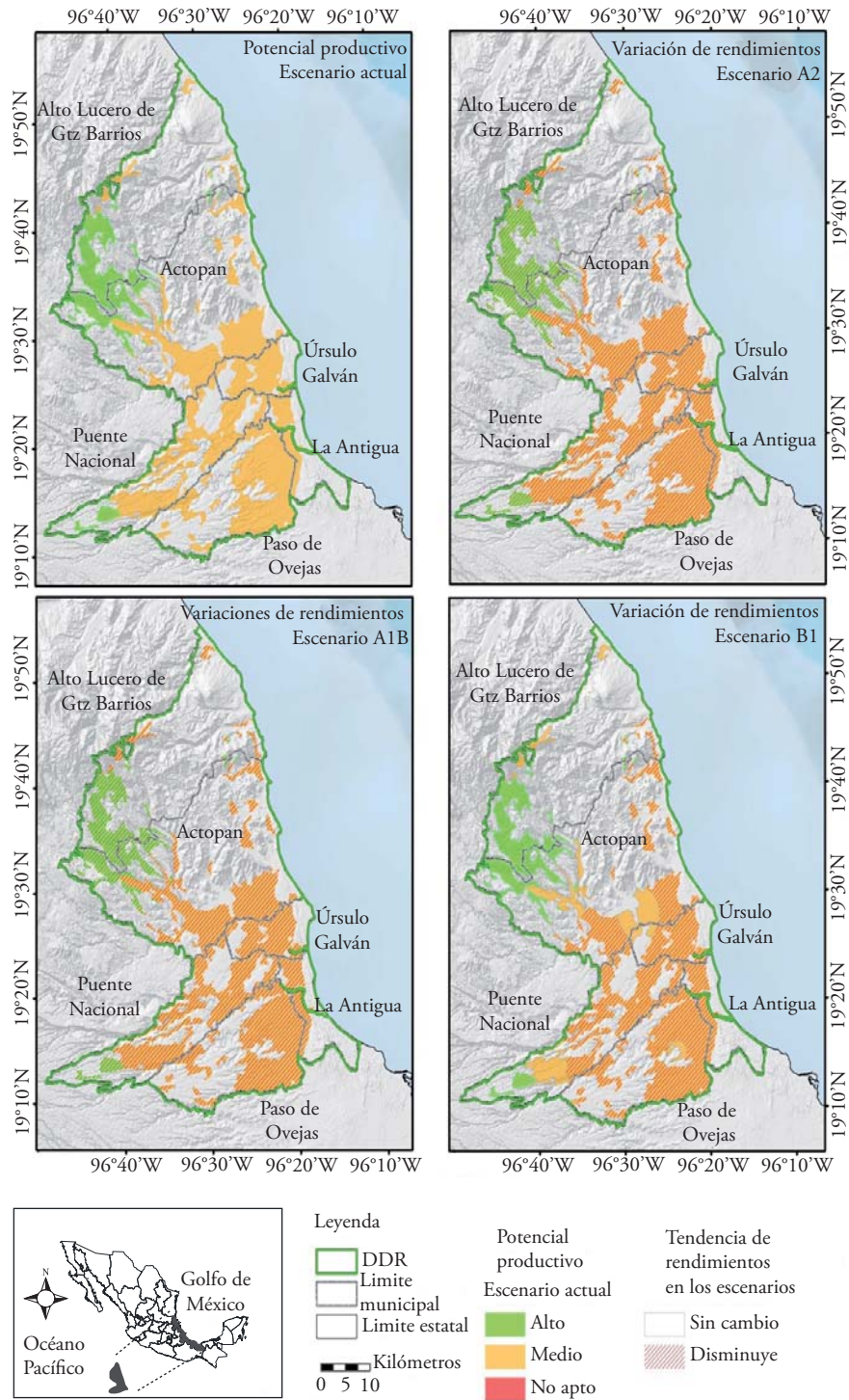


Figura 3. Variación espacial de rendimientos de maíz en áreas con potencial productivo en el DDR La Antigua, Veracruz, México, en diferentes escenarios de Cambio Climático.

Figure 3. Spatial variation of maize yields in areas with productive potential in the RDD La Antigua, Veracruz, Mexico, under different climate change scenarios.

Cuadro 3. Superficies con potencial productivo de maíz afectadas por escenarios de cambio climático en los municipios que integran el DDR La Antigua, Veracruz, México.
Table 3. Surfaces with productive potential for maize affected by climate change scenarios in the municipalities that make up the RDD La Antigua, Veracruz, Mexico.

Clave de municipio	Nombre de municipio	Potencial productivo	Superficie (ha)	Tendencia rendimientos	Superficie afectada en el escenario climático (ha)			Disminución promedio de rendimientos por escenario climático (kg ha ⁻¹)		
					A1B	A2	B1	A1B	A2	B1
004	Actopan	Alto	7,207	=	0	0	6,532	0	0	0.00
		Medio	21,200	↓	6,619	6,619	87	149.28	104.59	17.60
009	Alto Lucero de Gutiérrez Barrios	Alto	8,340	=	0	0	6,879	0.00	0.00	0.00
		Medio	3,005	↓	19,126	19,126	12,244	286.57	199.06	60.94
016	La Antigua	Alto	4,736	=	0	0	7,939	0.00	0.00	0.00
		Medio	22,029	↓	8,034	8,034	95	150.90	106.93	18.86
126	Paso de Ovejas	Alto	1,371	=	0	0	1,916	0.00	0.00	0.00
		Medio	19,159	↓	2,523	2,523	606	208.70	148.50	37.23
134	Puente Nacional	Alto	8,214	=	4,189	4,189	4,189	571.10	415.75	167.92
		Medio	8,214	↓	0	0	810	0.00	0.00	0.00
191	Úrsulo Galván	Alto	8,214	↓	21,391	21,391	20,580	383.87	277.00	87.35
		Medio	8,214	↓	0	0	1,310	0.00	0.00	3.29
191	Úrsulo Galván	Alto	8,214	↓	1,310	1,310	0	164.34	130.66	0.00
		Medio	8,214	↓	0	0	3,644	0.00	0.00	0.00
191	Úrsulo Galván	Alto	8,214	↓	18,299	18,299	14,655	297.90	225.92	92.84
		Medio	8,214	↓	0	0	748	0.00	0.00	0.00
191	Úrsulo Galván	Alto	8,214	↓	7,702	7,702	6,954	430.69	306.07	109.17
		Medio	8,214	↓	0	0	0	0.00	0.00	0.00

El escenario A1B incluyó crecimiento poblacional mayor al de los otros escenarios y uso creciente de energía; por lo que se asume emisión mayor de gases con efecto invernadero respecto a los otros dos escenarios. En estos se asumen demanda menor de bienes de consumo y emisión menor de gases a la atmósfera. Sin embargo, la respuesta de los cultivos en otras regiones puede ser diferir en función de la cercanía a los océanos y altitud.

El impacto en el rendimiento calculado en los escenarios de clima ensayados parece poco relevante; pero el método que se utilizó en la investigación puede ser trascendental. El modelo de simulación, usado para cuantificar el balance hídrico en el suelo (SICTOD), considera el contenido inicial de humedad en el suelo, los requerimientos de agua por los cultivos y lo estocástico del clima e incluye funciones de producción de los cultivos. Todo esto permite cuantificar el rendimiento probable bajo las restricciones climáticas impuestas.

Los escenarios de vulnerabilidad del cultivo de maíz, de presentarse condiciones de cambio climático en B1, en el DDR La Antigua, no se esperan cambios significativos en las áreas de potencial productivo identificadas por Díaz *et al.* (2012), principalmente en áreas de montaña, pues variación en características climatológicas para desarrollo del cultivo podrían ser mínimas ya que se beneficiarían por el incremento de temperatura en cualquiera de los escenarios evaluados. En contraste, en los escenarios A1B y A2 las variaciones climáticas sí afectarían el potencial productivo, y casi la totalidad del DDR podría presentar condiciones adversas que afectarían el rendimiento, principalmente en zonas con altitud baja. Debe señalarse que de aplicar el grupo nuevo de escenarios, denominados “trayectorias de concentración representativas” (RCP, por sus siglas en inglés), los resultados serían otros, ya que esos escenarios se centran en las emisiones antrópicas y no incluyen cambios en impulsores naturales, como el forzamiento solar o volcánico o las emisiones naturales de metano (CH_4) u óxido de nitrógeno (N_2O); además, estos cuentan con representaciones que van desde un escenario de mitigación considerando un forzamiento radioactivo total de 2.6 W m^{-2} (RCP2,6), pasando por escenarios de estabilización RCP4,5 y RCP6,0, hasta llegar a RCP8,5 que representa un escenario con un nivel muy alto de emisiones de gases con efecto invernadero.

between 199 and 287 kg ha^{-1} in scenarios A1B and A2 (Table 3).

The response of the crops to changes in climate patterns follows a combined effect of precipitation and temperature that modifies the physiological response of the crop. The increase in temperature, linked to water stress, enhances stomatal closing; this decreases the rate of gas exchange and affects the yield. The excess precipitation can decrease oxygenation in the soil and the rate of water and nutrient absorption by the crop.

Scenario A1B included a higher population growth than the other scenarios and a growing use of energy, which is why a greater emission of greenhouse effect gases is assumed, compared to the other two scenarios. In these, a lower demand of consumption goods is assumed as well as lower gas emission to the atmosphere. However, the response of crops in other regions can differ in function of the nearness to oceans and the altitude.

The impact on the yield calculated in the climate scenarios tested seems to be irrelevant, but the method used in the study can be transcendental. The simulation model used to quantify the water balance in the soil (SICTOD) considers the initial moisture content in the soil, the water requirements from the crops, and the stochastic nature of climate, and includes production functions of the crops. All of this allows quantifying the probable yield under the climate restrictions imposed.

In terms of vulnerability scenarios for the maize crop, if B1 climate change conditions are present in the RDD La Antigua, no significant changes are expected in the areas of productive potential identified by Díaz *et al.* (2012), which are mainly in mountainous areas, since variation in climatologic characteristics for crop development could be minimal for they would benefit from the increase in temperature in any of the scenarios evaluated. In contrast, in scenarios A1B and A2 the climate variations would affect the productive potential, and almost all of the RDD could present adverse conditions that would affect the yield, primarily in low altitude zones. It should be mentioned that if the new group of scenarios called “representative concentration pathways” (RCP) were to be applied, the results would be different, since these scenarios are centered on anthropic emissions and do not include changes in natural driving forces, such as solar or volcanic radiative forcing, or the

La presente propuesta metodológica pretende sentar las bases necesarias para que tomadores de decisiones y la sociedad en general cuenten con elementos científicos para desarrollar acciones que disminuyan la vulnerabilidad ante fenómenos climatológicos adversos en áreas con potencial productivo de maíz, bajo condiciones de secano en el ciclo PV, en la zona que delimita el Distrito de Desarrollo Rural de La Antigua.

Los modelos de simulación se utilizan en diversas ramas de la actividad humana y en la planificación de áreas agrícolas han permitido avances, como en la agilidad de los cálculos, en el procesamiento de la información y en la simulación de diferentes procesos. Esto permite conocimiento mayor y resultados confiables (Lhomme *et al.*, 1984; Jones y Tardieu, 1998); y ofrecen la posibilidad de modelar el desarrollo del cultivo de maíz en distintas fechas de siembra y ciclos. Con esto pueden redefinir fechas de siembra para aprovechar las condiciones hídricas mejores para el desarrollo de cultivos o la reconversión productiva. En la literatura existe una gran variedad de modelos para cuantificar o estimar el rendimiento de los cultivos mediante el balance de agua en el suelo, pero omiten el manejo de escenarios de cambio climático y no consideran la agricultura de secano.

La información cartográfica generada puede apoyar la planeación de esquemas de trabajo que conduzcan acciones de adaptación en condiciones de cambio climático, para el cultivo de maíz, y otros cultivos involucrados con la seguridad alimentaria..

CONCLUSIONES

Las condiciones de cambio climático B1, en el DDR La Antigua, no modificarían significativos el potencial productivo, al contrario la variación climatológica mínima puede beneficiar los escenarios que aquí se consideraron. Los escenarios A1B y A2 con sus variaciones climáticas sí afectarían el potencial productivo de casi la totalidad del DDR, especialmente en zonas con baja altitud.

La metodología de análisis para determinar las afectaciones que tendrá el cultivo de maíz debido a los efectos del cambio climático en este estudio es un avance significativo, pues es flexible y puede adaptarse a los esquemas definidos en el Quinto informe de Evaluación, el que incorpora escenarios nuevos, denominados "trayectorias de concentración representativas" (RCP, por sus siglas en inglés).

natural emissions of methane (CH₄) or nitrogen oxide (N₂O); in addition, these have representations that range from a scenario of mitigation considering a total radioactive forcing of 2.6 W m⁻² (RCP2,6), going through scenarios of stabilization RCP4,5 and RCP6,0, until reaching RCP8,5 which represents a scenario with a very high level of greenhouse gas emissions.

This methodological proposal attempts to set the necessary bases for decision makers and society in general to have scientific elements to design actions that decrease the vulnerability to adverse climate phenomena in areas with productive potential for maize, under rainfed conditions in the SS cycle, in the zone within the Rural Development District of La Antigua.

The simulation models are used in diverse fields of human activity and in the planning of agricultural areas they have facilitated advances, such as the agility of calculations, in information processing and in the simulation of different processes. This allows greater understanding and reliable results (Lhomme *et al.*, 1984; Jones and Tardieu, 1998), and offers the possibility of modeling the development of maize cultivation in different dates of sowing and cycles. Sowing dates may be redefined with this, in order to take advantage of the best hydric conditions for the development of crops or productive reconversion. In the literature, there is a great variety of models to quantify or estimate the yield of crops through the soil water balance, but they omit the management of climate change scenarios and do not consider dryland agriculture.

The cartographic information generated can contribute to planning the working schemes that lead to adaptation actions under conditions of climate change, for maize growing, and cultivation of other crops involved in food security.

CONCLUSIONS

The conditions of climate change B1, in the RDD La Antigua, would not cause significant changes in productive potential; to the contrary, the minimum climate variation could benefit the scenarios considered here. Scenarios A1B and A2 with their climate variations would affect the productive potential of almost all of the RDD, especially in zones with low altitude.

AGRADECIMIENTOS

Al Posgrado en Geografía de la Universidad Nacional Autónoma de México, por el apoyo brindado en el uso de sus instalaciones, equipo y software para alumnos de la Maestría en Geografía.

Al Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), por su respaldo y apoyo en la obtención del grado de Maestro en Geografía.

Al Licenciado en Sistemas Computacionales Administrativos Moisés Fernando Cortina Cardeña y a la Licenciada en Estadística Columba Falfán Castillo, por su apoyo en el procesamiento de bases de datos climáticas.

LITERATURA CITADA

- Allen, R. G., L. S. Pereira, D. Raes, y M. Smith. 2006. Evapotranspiración del Cultivo: Guías para la Determinación de los Requerimientos de Agua de los Cultivos. Riego y drenaje. FAO. Roma, Italia. pp: 7-13.
- Addinsoft, 2014. XLSTAT software estadístico para Microsoft Excel. Software de computadora en su versión de prueba. <http://www.xlstat.com/es/>. New York. Addinsoft SARL.
- Carbajal C., M., C. Yarlequé, A. Posadas, E. Silvestre, A. Mejía, y R. Quiróz, 2010. Reconstrucción de datos faltantes de precipitación pluvial diaria mediante la Transformada Wavelet. *Rev. Peru. Geo-Atmos.* 2: 76-88.
- Comisión Nacional del Agua – Servicio Meteorológico Nacional (CNA-SMN). 2014. Red de Estaciones Climatológicas. <http://smn.cna.gob.mx/>. México (Consulta: septiembre 2014).
- Comisión Nacional del Agua – Servicio Meteorológico Nacional (CNA-SMN). 2010. Red de Estaciones Climatológicas. <http://smn.cna.gob.mx/>. México (Consulta: octubre 2010).
- Conde, C., R. M. Ferrer, C. Gay, y R. Araujo. 2004. Impactos del cambio climático en la agricultura en México. *In: Martínez, J., y A. Fernández B. (comp).* Cambio Climático: Una Visión desde México. pp: 227-238.
- De Santa O., F. M., F. López F., y A. Calera B. 2005. Agua y Agronomía. Mundi-Prensa S.A. Universidad de Castilla La Mancha. Madrid, España. 603 p.
- Diario Oficial de la Federación (DOF). 2001. Ley de Desarrollo Rural Sustentable. México, D.F. México. Viernes 7 de diciembre de 2001.
- Díaz P., G., R.A. Guajardo P., G. Medina G., I. Sánchez C., J. Soría R., J. M. P. Vázquez A., J. A. Quijano C., F. Legorreta P., y J. A. Ruíz C. 2012. Potencial productivo de especies agrícolas de importancia socioeconómica en México. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (SAGARPA-INIFAP). Cotaxtla, Veracruz. México. 140 p.
- Díaz P., G., I. Sánchez C., y R. A. Guajardo P. 2011. Análisis de series de tiempo de clima para tomar decisiones en México. *In: Oswald, S. U. Retos de la Investigación del Agua en México.* Universidad Nacional Autónoma de México

The analysis methodology used to determine the affectations that the maize crop would have due to climate change effects in this study is an important advancement, for it is flexible and can be adapted to the schemes defined in the Fifth Evaluation Report, which incorporates new scenarios, called “representative concentration pathways” (RCP).

—End of the English version—



- (UNAM). Centro Regional de Investigaciones Multidisciplinarias (CRIM). Cuernavaca, Morelos. México. 754 p.
- Díaz P., G., J. A. Ruíz C., M. A. Cano G., V. Serrano A., y G. Medina G. 2006. Estadísticas climatológicas básicas del estado de Veracruz (Periodo 1961-2003). Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (SAGARPA-INIFAP). Cotaxtla, Veracruz. México. 292 p.
- Dirmeyer, P. A., C. A. Schlosser, and K. L. Brubaker. 2009. Precipitation, recycling and land memory: An integrated analysis. *J. Hydrometeorol.* 10: 278-288.
- El Financiero. 2011. Pérdidas agrícolas por más de 45 mil mdp por heladas. *El Financiero*, 14 Febrero de 2011. p. 16.
- ESRI 2011. ArcGIS Desktop: Release 10. Redlands, CA: Environmental Systems Research Institute.
- Estévez, J., y P. Gavilán. 2008. Procedimientos de validación de datos de estaciones meteorológicas automáticas. Aplicación a la red de información agroclimática de Andalucía. Plataforma de asesoramiento y transferencia del conocimiento agrario y pesquero de Andalucía. Instituto de Investigación y Formación Agraria y Pesquera. Consejería de Agricultura, Pesca y Desarrollo Rural. pp: 1-12.
- Conde, C., R. M. Ferrer, y D. Liverman. 2000. Estudio de la vulnerabilidad de la agricultura de maíz de temporal mediante el modelo cereales – maíz. *In: Gay G., C. (comp).* México: una Visión hacia el Siglo XXI. El Cambio Climático en México. Instituto Nacional de Ecología, Universidad Nacional Autónoma de México, US Country Studies Program. México. pp: 93-110.
- Gobierno del estado de Veracruz. 2009. Manual por regiones Distrito de Desarrollo Rural 06 La Antigua. Departamento de Gestión Educativa. Área Productiva. Red Comunitaria Vasconcelos. Xalapa, Ver. 52 p.
- Hainie A., N., and D. S. Mohd 2013. Homogeneity test on daily rainfall series for Malaysia. *Matematika* 29: 141-150.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). 2014. Marco Geoestadístico Municipal. <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/geoestadistica/>. Aguascalientes, México (Consulta: septiembre 2014).
- Jones, H. G., and F. Tardieu. 1998. Modelling water relations of horticultural crops a review. *Sci. Hortic.* 74: 21-46.

- Lhomme, J. P., L. Gómez, y A. Jaramillo. 1984. Modelo matemático del balance hídrico. *Turrialba* 34: 503-507.
- Ojeda-Bustamante, W., E. Sifuentes-Ibarra, M. Íñiguez-Covarubias, M. J. Montero-Martínez. 2011. Impacto del cambio climático en el desarrollo y requerimientos hídricos de los cultivos. *Agrociencia* 45: 1-11.
- Ortiz S., C. A. 1984. Elementos de Agrometeorología Cuantitativa: Con Aplicaciones en la República Mexicana. Universidad Autónoma de Chapingo Departamento de suelos. Universidad Autónoma de Chapingo. Texcoco, Edo. de México. 327 p.
- Pántano, V. C., L. B. Spescha, O. C. Penalba, y G. M. Murphy. 2014. Influencia de la variabilidad de temperatura y precipitación en la situación hídrica del suelo, en la región oriental de seco de la Argentina. *Meteorológica* 39: 21-36.
- Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC). 2008. Cambio climático 2007: Informe de síntesis. Contribución de los grupos I, II y III al Cuarto Informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. Organización Meteorológica Mundial (OMM)-Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA). Ginebra, Suiza. 114 p.
- Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC). 2000. Informe Especial del IPCC: Escenarios de emisiones. Organización Meteorológica Mundial (OMM)-Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA). Ginebra, Suiza. 27 p.
- Pizarro T., R., C. Ramírez B., y J. P. Flores V. 2003. Análisis comparativo de cinco métodos para la estimación de precipitaciones areales anuales en periodos extremos. *Bosque (Chile)* 24: 31-38.
- Reuters, 2012. Pérdidas agrícolas por sequía en México superan los 16 mil mdp en 7 años: EE.UU. *La Jornada*, 4 de abril de 2012.
- Sánchez C., I., G. Díaz P., M. Velazquez V., D. C. Slack, P. Heilman, and A. Pedroza S. 2015. A decision support system for rainfed agricultural areas of Mexico. *Comput. Electron. Agric.* 114: 178-188.
- Sánchez C., I. 2013. Modelo de balance hídrico como apoyo a toma de decisiones en zonas agrícolas bajo incertidumbre climática. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP). Gómez Palacio, Durango. México. (Folleto Técnico Núm. 28). 58 p.
- Sánchez C. I. 1994. Evaluating strip farming systems for arid ecosystems a stochastic approach. Doctoral Thesis dissertation. University of Arizona. 111 p.
- Schonwiese, C. D. and J. Rapp. 1997. Climate trend atlas of Europe based on observation 1891-1990. *Int. J. Climatol.* 18: 580-581.
- Semenov, M. A. and E. M. Barrow. 2002. Lars-WG: A stochastic weather generator of use in climate impact studies. Rothamsted Research. Harpenden, Gertfordshire. United Kingdom. 28 p.
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). 2015. Cierre de la producción agrícola bajo condiciones de temporal ciclo PV de maíz del 2014. <http://www.siap.gob.mx/>. Consulta: 11 de febrero de 2014.
- Stöckle, C. O. and Nelson, R. 2014. CS Suite-ClimGen. Software de computadora de libre acceso http://modeling.bsys.wsu.edu/CS_Suite/ClimGen/documentation/abstract/es.htm. Washington State University. Washington, USA (Consulta: febrero 2014).
- Suescun J., M., 2012. Aplicación de modelos de generación de variables meteorológicas para la gestión del riego en la provincia de Álava. Universidad Pública de Navarra: Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos. Navarra, España. 110 p.
- UNE 500540, 2004. Redes de estaciones meteorológicas automáticas: Directrices para la validación de registros meteorológicos procedentes de redes de estaciones automáticas: Validación en tiempo real. Asociación española de normalización y certificación. AENOR. España. 7 p.
- Velasco H., M. de los A., T. Morales A., N. G. Estrella Ch., R. Díaz R., J. P. Juárez S., M. Hernández V., y R. Bernal M. 2015. Tendencias y variabilidad de índices de cambio climático: enfoque agrícola en dos regiones de México. *Rev. Mex. Cienc. Agríc.* 6: 1587-1599.
- Wreford, A., D. Moran, and N. Adger. 2010. Climate change and agriculture: impacts adaptation and mitigation. Organization for Economic Cooperation and Development (OECD). Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA). Ginebra, Suiza. 140 p.
- Wijngaard, J. B., A. M. G. Klein T., and G. P. Konnen, 2003. Homogeneity of 20th century European daily temperature and precipitation series. *Int. J. Climatol.* 23: 679-692.