

Utilizando el modelo Newhall para representar el impacto real del cambio climático en la humedad de suelo en Jalisco, México*

Using the Newhall model to depict the impacts of climate change on soil moisture in Jalisco, Mexico

Jorge Pedro Topete Ángel¹, José Ariel Ruiz Corral^{2§}, José Ron Parra¹, Diego Raymundo González Eguiarte¹, Gabriela Ramírez Ojeda² y Noé Durán Puga³

¹Centro Universitario de Ciencias Biológicas y Agropecuarias (CUCBA)-Universidad de Guadalajara. Carretera a Nogales km 15.5, Predio Las Agujas, Zapopan, Jalisco, México. C. P. 45110. Tel: 10 33 37 77 11 50. ²Campo Experimental Centro-Altos de Jalisco-INIFAP, carretera libre Tepatitlán-Lagos de Moreno km 8. 47600 Tepatitlán, Jalisco, México. ³Unidad Académica de Agricultura. Universidad Autónoma de Nayarit. Carretera Tepic-Compostela, km 9. Xalisco, Nayarit, México. C. P. 63780. §Autor de correspondencia: ruiz.ariel@inifap.gob.mx.

Resumen

El presente estudio tuvo como objetivo estimar los impactos del cambio climático del período 2040-2069 sobre la humedad del suelo y la sequía en tierras agrícolas del estado de Jalisco, México, considerando suelos de tres grandes clases texturales: de textura gruesa, de textura media y de textura fina. Para representar la climatología futura mencionada anteriormente, se utilizaron datos simulados de precipitación y temperatura a partir del modelo GCM MPIM-ECHAM5 con reducción de escala (Método Delta) y escenario de emisiones de gases efecto invernadero A2. Esta información fue recuperada del sitio Earth System Grid (ESG) de WorldClim en forma de imágenes grid, las cuales fueron transformadas en imágenes raster con una resolución de 2.5 minutos de arco. Se implementó el uso del modelo Newhall con estos datos y con los datos climáticos correspondientes al periodo 1961-1990 para simular días húmedos, días secos y días medio secos, así como el número total de días consecutivos húmedos durante el año. Los resultados de las simulaciones de Newhall para ambos periodos climáticos se compararon a través de un análisis estadístico para determinar el posible impacto del cambio climático sobre la disponibilidad de humedad del suelo en las áreas agrícolas de Jalisco. Tendencias estadísticamente significativas ($p < 0.05$) mostraron que la temperatura y

Abstract

This study aimed to estimate the impacts of climate change for the period 2040-2069 on soil moisture and drought on agricultural land in the State of Jalisco, Mexico, considering three soil textural classes: coarse textured, medium textured and fine textured. To represent the future climate mentioned above, simulated precipitation and temperature from the model MPIM-ECHAM5 GCM downscaled (Delta Method) and emissions scenario A2 greenhouse gas data were used. This information was retrieved from the site Earth System Grid (ESG) of WorldClim shaped grid images, which were converted into raster images with a resolution of 2.5 arcmin. Using the model Newhall these data and climate data for the period 1961-1990 to simulate wet days, dry days and dry half days, and the total number of consecutive wet days during the year was implemented. The results of the simulations of Newhall for both climatic periods were compared by statistical analysis to determine the possible impact of climate change on the availability of soil moisture in agricultural areas of Jalisco. Statistically significant trends ($p < 0.05$) showed that the temperature and potential evapotranspiration will increase, while the length of the growing season will decrease and this will significant effect on sites of medium texture, followed by fine textured. Other (although not statistically significant)

* Recibido: febrero de 2014
Aceptado: junio de 2014

evapotranspiración potencial se incrementarán, mientras que la longitud de la estación de crecimiento disminuirá, siendo este efecto más significativo en sitios de textura media, seguidos por los de textura fina. Otras tendencias identificadas (aunque no estadísticamente significativas) fueron que el número de días húmedos y medio secos disminuirá; como contraparte, los días secos se incrementarán. Estos resultados señalan la necesidad de implementar medidas de adaptación enfocadas en la economía del agua en los suelos del estado, así como tratamientos de suelos para mejorar la capacidad de retención de humedad y proyectos de captación de agua *in situ*.

Palabras clave: cambio climático, humedad del suelo, textura del suelo, modelo Newhall.

Introducción

La disponibilidad de humedad en el suelo es una componente agroclimática de alta relevancia para la práctica de agricultura. Bajo condiciones de temporal, la disponibilidad de humedad en el suelo es una función del balance hídrico, el cual está determinado por la cantidad de precipitación ocurrente, la capacidad de almacenamiento de agua en el suelo y las pérdidas de agua a través de procesos como la evapotranspiración, el escurrimiento y la percolación profunda (Ines *et al.*, 2001). En áreas tropicales y subtropicales, la estación de crecimiento para los cultivos está básicamente determinada por la duración de humedad disponible en el suelo, lo cual depende de la textura de éste y va desde el inicio de la temporada de lluvias hasta la finalización de ésta, más el número de días requerido para que se agote (a través de la evapotranspiración del cultivo) la humedad remanente almacenada en el suelo (Eitzinger *et al.*, 2004).

El cambio climático altera los patrones de temperatura, nubosidad y precipitación, y, como consecuencia, también los patrones de evapotranspiración y de humedad disponible en el suelo (Hatfield *et al.*, 2011; Ojeda *et al.*, 2011; Ruiz *et al.*, 2011).

El cambio en precipitación tiene un efecto menor sobre la humedad del suelo en cuencas húmedas, pero en cuencas secas el porcentaje de cambio en los niveles de humedad del suelo puede ser mayor que el porcentaje de cambio en la lluvia; esto es de gran importancia en suelos arcillosos y delgados. Comparada con la precipitación, los incrementos de la temperatura por sí solos tienen un impacto insignificante sobre el escurrimiento y humedad del suelo (Chiew *et al.*,

trends identified were that, the average number of wet and dry days will decrease; counterparty, dry days will increase. These results indicate the need to implement adaptation measures focused on the economics of soil water status and soil treatments to improve moisture retention capacity and water harvesting projects *in situ*.

Keywords: climate, soil moisture, soil texture, model Newhall.

Introduction

The availability of soil moisture is an agroclimatic component highly relevant to the practice of agriculture. Under rainfed conditions, the availability of soil moisture is a function of the water balance, which is determined by the amount of precipitation, water storage in soil and water losses through processes such as evapotranspiration, runoff and deep percolation (Ines *et al.*, 2001). In tropical and subtropical areas, the growing season for crops is basically determined by the length of available soil moisture, which depends on the texture and it goes from the beginning of the rainy season until the end of it, plus the number of days required for depletion (through crop evapotranspiration) the residual moisture stored in the soil (Eitzinger *et al.*, 2004).

Climate change alters patterns of temperature, cloudiness and precipitation and, consequently, also the patterns of evapotranspiration and available soil moisture (Hatfield *et al.*, 2011; Ojeda *et al.*, 2011; Ruiz *et al.*, 2011).

The change in precipitation has less effect on wet soil moisture basins, but in dry basins percent change in soil moisture levels may be higher than the percentage change in rain; this is of great importance in clay, thin soils. Compared to precipitation, temperature increases alone have a negligible impact on runoff and soil moisture (Chiew *et al.*, 1995). When kept constant all the variables that influence the ETP and only temperature increases; the ETP reference increases 3.4% per Celsius degree (Kimball, 2007).

Climate change may also increase rainfall in some regions, but this is usually accompanied by an increase in rainfall variability, which by interacting with higher temperatures and drying can lead to regional droughts (Izaurrealde *et al.*, 2011).

1995). Cuando se mantienen constantes todas las variables que influyen en la ETP y sólo se incrementa la temperatura; la ETP de referencia aumenta 3.4% por cada grado Celsius de incremento (Kimball, 2007).

El cambio climático también puede incrementar la lluvia en algunas regiones, pero esto es generalmente acompañado por un incremento en la variabilidad de la lluvia, el cual al interactuar con temperaturas más altas y desecantes, puede conducir a sequías regionales (Izaurre et al., 2011).

En México, uno de los estados más importantes para la agricultura de temporal es Jalisco. Estudios recientes han demostrado que la temperatura de las áreas agrícolas de México se ha venido incrementando de manera perceptible desde la década de los años 1990's del siglo pasado (Zarazúa et al., 2011; Ruiz et al., 2014). Existen evidencias de la presencia del cambio climático en Jalisco, México, las cuales muestran cambios en los patrones regionales de lluvia durante las últimas décadas (Ruiz y Regalado, 2014); que a su vez están causando una disminución gradual de la estación de crecimiento (Ruiz et al., 2000a; Zarazúa et al., 2011) y una reducción en la superficie potencial de producción de cultivos (Ruiz et al., 2000b; Zarazúa et al., 2011).

Los escenarios climáticos predichos para el siglo XXI, establecen en términos generales, un incremento de la temperatura y una ligera disminución de la precipitación anual en las zonas de cultivo (IPCC, 2007; Ruiz et al., 2011). Las predicciones para el estado de Jalisco también establecen un incremento sostenido de la temperatura, durante las primeras cinco décadas del presente siglo, hasta alcanzar un incremento de 1.5 a 2.5 °C durante el período 2051-2060 (Ruiz et al., 2011; Ruiz y Regalado, 2014). Las consecuencias de estos cambios están directamente ligadas a un balance hídrico menos positivo en suelos, y una reducción en la estación de crecimiento en áreas tropicales y subtropicales (Ojeda et al., 2011; Ruiz et al., 2011).

Los cambios presentes y futuros en humedad del suelo de las áreas agrícolas están ya demandando el desarrollo de medidas de adaptación para los sistemas agrícolas, pero uno de los primeros datos que se deben conocer es la dimensión de estos cambios. De acuerdo con lo anterior, el objetivo de este estudio fue estimar el efecto del cambio climático sobre la estacionalidad y la duración de la humedad del suelo en las tierras agrícolas de temporal de Jalisco, mediante la utilización del Modelo Newhall.

In Mexico, one of the most important States for rainfed agriculture is Jalisco. Recent studies have shown that the temperature of the agricultural areas of Mexico has been increasing noticeably since the early 1990's of the last century (Zarazúa et al., 2011; Ruiz et al., 2014.). There is evidence of the presence of climate change in Jalisco, Mexico, which show changes in regional rainfall patterns in recent decades (Ruiz and Regalado, 2014); which in turn are causing a gradual decrease in the growing season (Ruiz et al., 2000a; Zarazúa et al., 2011) and a reduction in surface potential crop production (Ruiz et al., 2000b; Zarazúa et al., 2011).

The predicted for the twenty-first century, climate scenarios set out in general terms, an increase in temperature and a slight decrease in annual rainfall in growing areas (IPCC, 2007; Ruiz et al., 2011). The predictions for the State of Jalisco also establish a sustained increase in temperature during the first five decades of this century, reaching an increase of 1.5 to 2.5 °C, over the period 2051-2060 (Ruiz et al., 2011; Ruiz and Regalado, 2014). The consequences of these changes are directly related to a less positive water balance in soils, and a reduction in the growing season in tropical and subtropical areas (Ojeda et al., 2011; Ruiz et al., 2011).

The present and future changes in soil moisture in agricultural areas are already demanding the development of adaptation measures for agricultural systems, but one of the first details that should be known is the extent of these changes. Accordingly, the objective of this study was to estimate the effect of climate change on the seasonality and duration of soil moisture in rainfed farmland of Jalisco, using the model Newhall.

Materials and methods

Weather data of reference

Weather stations are located in agricultural areas of the State of Jalisco, resulting 73 in total: 16 in fine-textured soils, 5 coarse textured soils and 52 in medium textured soils. From these stations, temperature data and monthly and annual average precipitation for the 1961-1990 period was recovered. This information was obtained from the website of CIAT (<http://gisweb.ciat>).

Materiales y métodos

Datos climáticos de referencia

Se localizaron las estaciones meteorológicas que se ubican en las áreas agrícolas del estado de Jalisco, resultando 73 en total: 16 en suelos de textura fina, 5 en suelos de textura gruesa y 52 en suelos de textura media. De estas estaciones se recuperó la información de temperatura y precipitación normal mensual y anual para el periodo 1961-1990. Esta información fue obtenida de la página web del CIAT (<http://gisweb.ciat.cgiar.org/GCMPPage/>) y fue considerada como la climatología de referencia en los análisis comparativos contra escenarios de cambio climático.

Análisis estadístico

Se analizó la normalidad de los datos de precipitación y temperatura de las estaciones de suelos de textura gruesa, de textura fina y de textura media, mediante las pruebas de Shapiro-Wilk y Kolmogorov-Smirnov. Posteriormente mediante un análisis de varianza se compararon los valores de temperatura y precipitación anual entre los tres grupos, los cuales presentaron una n (estaciones meteorológicas) distinta entre sí. Finalmente se realizó una prueba f y de t para muestras apareadas, considerando para las climatologías 1961-1990 y 2040-2069 los valores de los siguientes parámetros: temperatura media anual (T_a), precipitación acumulada promedio anual (P_a), evapotranspiración potencial acumulada promedio anual (ETPa), número de días húmedos (H), número de días medio secos (MS), número de días secos (S) y longitud de la estación de crecimiento (LEC). La longitud de la estación de crecimiento se estimó considerando los días húmedos y días medio secos.

Simulación de la humedad del suelo en suelos de textura gruesa, media y fina

Se utilizaron los promedios normales de precipitación y temperatura durante el periodo 1961-1990 y 2040-2069 de las 73 estaciones meteorológicas, para simular la condición de humedad del suelo en condiciones de textura gruesa, fina y media. Con dichos valores normales se corrió el modelo Newhall 1.6 con el propósito de comparar la condición de referencia contra la condición futura del régimen hídrico del suelo. Los datos climáticos 2040-2069 fueron extraídos de imágenes generadas a través de procesos de reducción de escala (Método Delta) sobre experimentos realizados

gisweb.ciat.cgiar.org/GCMPPage/) and was considered the reference climatology in benchmarking against climate change scenarios.

Statistical analysis

Normality of precipitation and temperature data stations coarse textured soils with fine texture and of medium texture was analysed by testing Shapiro-Wilk and Kolmogorov-Smirnov. Subsequently by analysis of variance values of temperature and annual precipitation between the three groups were compared, which showed a difference from each other. Finally, a f and t test for paired samples was performed, considering for the 1961-1990 and 2040-2069 climatology values for the following parameters: mean annual temperature (T_a), annual average accumulated precipitation (P_a), evapotranspiration potential cumulative annual average (ETPa), number of wet days (H), average number of dry days (MS), number of dry days (S) and length of the growing season (LEC). The length of the growing season was estimated considering the average wet and dry days.

Simulated soil moisture in soils of coarse, medium and fine texture

Normal precipitation and temperature averages were used during the period 1961-1990 and 2040-2069 from 73 meteorological stations to simulate the soil moisture condition in terms of coarse, fine and medium texture. With these normal data we used the model Newhall 1.6 in order to compare the reference condition against future status of soil water regime. The 2040-2069 climate data were extracted from images generated by downscaling process (method Delta) for experiments with general circulation model (GCM) GCM MPI_ECHAM5 and A2 emissions scenario. The images have a resolution of 2.5 arcmin (Ramírez and Jarvis, 2010). The 2040-2069 weather was also obtained from the website of CIAT (<http://gisweb.ciat.cgiar.org/GCMPPage/>).

The model Newhall focuses on determining the thermal and water regimes in soils, and was adopted by the Soil Survey Staff of the United States to describe moisture regimes used in the System of Soil Taxonomy EES (Soil Survey Staff, 1975, 1992). In the model Newhall the soil is referred to as a water reservoir with a fixed capacity, the water is added for precipitation, the excess amount of holding capacity soil moisture is lost by deep leaching or runoff and water retained

con el modelo de circulación general (GCM) GCM MPI_ECHAM5 y escenario de emisiones A2. Las imágenes tienen una resolución de 2.5 minutos de arco (Ramírez y Jarvis, 2010). La climatología 2040-2069 fue obtenida también de la página web del CIAT (<http://gisweb.ciat.cgiar.org/GCMPPage/>).

El modelo Newhall se enfoca a determinar los regímenes hídrico y térmico en suelos, y fue adoptado por el Soil Survey Staff de los Estados Unidos de América, para describir los regímenes de humedad utilizados en el Sistema de Taxonomía de Suelos de EE.UU (Soil Survey Staff, 1975, 1992). En el modelo Newhall el suelo es referido como una reserva de agua con capacidad fija, el agua se añade por precipitación, la cantidad excedente de la capacidad de retención de humedad del suelo se pierde por lixiviación profunda o escurrimiento y el agua retenida en el suelo se pierde por evapotranspiración. Este modelo utiliza el método de Thornthwaite (Thornthwaite, 1948) para estimar la evapotranspiración a partir de datos de temperatura y duración del día, para lo cual se proporciona el dato de latitud. En la implementación del modelo, de acuerdo con Topete et al. (2014) el perfil de humedad considerado para suelos de textura gruesa, media y fina fue de 90 mm, 80 y 70 mm, respectivamente.

Resultados y discusión

Los resultados del análisis estadístico de temperatura y precipitación anual de las estaciones meteorológicas que corresponden a los tres grupos texturales, se muestran en el Cuadro 1. Como puede observarse todas las series de datos climáticos resultaron con una distribución normal, aun cuando ésta fue analizada con estadísticos distintos de acuerdo con el número de observaciones de los tres grupos texturales. El análisis de varianza no reportó diferencia significativa entre grupos texturales para precipitación y temperatura (Cuadro 2).

Cuadro 1. Estadísticos básicos, normalidad y valor del estadístico Kolmogorov-Smirnov para datos normales de precipitación y temperatura anuales periodo 1961-1990 en sitios con textura de suelo gruesa, media y fina.

Table 1. Basic statistics, normality and statistical value of Kolmogorov-Smirnov for normal annual precipitation data and temperature 1961-1990 at sites with coarse textured, medium and fine soil.

Variable (n)	Media	Desviación estandar	Kolmogorov-Smirnov	Shapiro-Wilks	Normalidad
<i>Lluvia (mm)</i>					
Textura gruesa (5)	993.84	224.4	0.341	0.833	Normal
Textura media (52)	797.94	215.11		Normal	
Textura fina (16)	892.12	194.69		0.854	Normal
<i>Temperatura (°C)</i>					
Textura gruesa (5)	23.2	2.79	0.493	0.744	Normal
Textura media (52)	19.81	2.77		Normal	
Textura fina (16)	20.02	1.76		0.896	Normal

in soil is lost through evapotranspiration. This model uses the method of Thornthwaite (Thornthwaite, 1948) to estimate evapotranspiration from temperature data and time of day, for which the data is provided latitude. In implementing the model, according to Topete *et al.* (2014) considered moisture profile of soil with coarse, medium and fine texture was 90 mm, 80 mm and 70 mm, respectively.

Results and discussion

The results of the statistical analysis of temperature and annual precipitation from weather stations that correspond to the three textural groups are shown in Table 1. As can be seen, all climate data sets resulted in a normal distribution, even when it was analysed statistical different according to the number of observations of the three textural groups. The ANOVA reported no significant difference between groups for textural precipitation and temperature (Table 2).

The results of the F tests comparing variances and t test for comparison of means for the periods 1961-1990 versus 2040-2069 in relation to humidity parameters resulting from the simulation model Newhall 1.6, are shown in Table 3. As can be seen, six cases were identified in which the means of the parameters are statistically different, most with a significance $p \leq 0.01$. Three of these cases corresponded to sites with soil of medium texture and the other three sites with fine-textured soil. For sites with coarse textured cases not statistically significant for either test variance (F) and for the mean test (t) differences were identified.

The values of the parameters analysed comparatively for the climatology 1961-1990 and 2040-2069, as can be seen in the Tables 4 (coarse textured sites), 5 (fine texture sites) and Table 6 (medium texture sites).

Los resultados de las pruebas F de comparación de varianzas y pruebas t de comparación de medias para los periodos 1961-1990 *versus* 2040-2069 en relación con los parámetros de humedad resultantes de la simulación con el modelo Newhall 1.6, se muestran en el Cuadro 3. Como puede observarse, se identificaron seis casos en que las medias de los parámetros son estadísticamente diferentes, la mayoría con una significancia $p \leq 0.01$. Tres de estos casos correspondieron a los sitios con suelo de textura media y los otros tres a sitios de con suelo de textura fina. En el caso de los sitios con textura gruesa no se identificaron casos de diferencias estadísticamente significativas ni para la prueba de varianzas (F) ni para la prueba de medias (t).

Cuadro 2. Análisis de varianza para datos de temperatura y precipitación de sitios de tres grupos texturales.

Table 2. Analysis of variance for temperature and precipitation data from three sites textural

Fuente de variación	GL	CME	F	Significancia
Entre grupos	2	124 558.675	2.786	0.069
Dentro de grupos	70	44 713.313		
Total	72			

In cases of significant variation in the average value of fine-textured sites, projecting average annual temperature, ETPA and length of the growing season, increasing the temperature 2.5 °C and ETPA 21%, while the LEC dropped

Cuadro 3. Resultados de la prueba de t y prueba de F en la comparación de medias 1961-1990 versus 2040-2069 de diversos parámetros climáticos y de humedad del suelo en sitios de textura gruesa, textura fina y textura media.

Table 3. Results of test F and t test compared in the means from 1961 to 1990 versus 2040 to 2069 of various climatic parameters and soil moisture at sites of coarse texture, fine texture and medium texture.

Parámetro	F	P (misma varianza)	t	P (misma media)
Suelos de textura gruesa				
Precipitación anual (mm)	6.301	0.102	0.018	0.986
Temperatura media anual (°C)	1.229	0.846	-1.115	0.297
ETP anual (mm)	1.512	0.698	-1.157	0.281
Días húmedos al año	1.186	0.873	0.55	0.597
Días medio secos al año	1.414	0.745	0.615	0.555
Días secos al año	1.024	0.982	-0.631	0.545
Longitud de la EC (días)	1.093	0.933	0.471	0.65
Suelos de textura fina				
Precipitación anual (mm)	1.336	0.582	1.048	0.303
Temperatura media anual (°C)	1.137	0.806	3.979	0.001**
ETP anual (mm)	1.966	0.202	3.588	0.001**
Días húmedos al año	1.516	0.429	-1.392	0.174
Días medio secos al año	4.524	0.006**	-0.032	0.974
Días secos al año	1.106	0.848	1.443	0.159
Longitud de la EC (días)	1.158	0.78	-2.135	0.041*
Suelos de textura media				
Precipitación anual (mm)	1.638	0.081	-1.299	0.196
Temperatura media anual (°C)	1.13	0.663	-5.243	0.001**
ETP anual (mm)	1.531	0.132	-4.9	0.001**
Días húmedos al año	1.536	0.128	0.46	0.646
Días medio secos al año	1.598	0.097	2.92	0.004**
Días secos al año	1.2961	0.357	1.393	0.166
Longitud de la EC (días)	2.403	0.002**	7.424	0.001**

Los valores de los parámetros analizados de manera comparativa para las climatologías 1961-1990 y 2040-2069, se pueden ver en los Cuadros 4 (sitios de textura gruesa), 5 (sitios de textura fina) y Cuadro 6 (sitios de textura media).

10 days changing from 1961-1990 to 2040-2069 (Table 5). For significant change in variance reports the dry half days, going from a value of 173.5 to 784.7; ie, it would turn into a changing parameter in the future (2040-2069),

Cuadro 4. Parámetros de simulación de la humedad del suelo con el modelo Newhall 1.6 en sitios con textura gruesa, en dos climatologías: A: 1961-1990; B: 2040-2069.**Table 4. Parameters of simulated soil moisture with the model Newhall 1.6 at sites with coarse texture, two climatologies: A: 1961-1990; B: 2040-2069.**

Estación	Pa (mm)		Ta (°C)		ETPa (mm)		Días H		Días MS		Días S		Longitud EC	
	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B
El Chiflón	1375.2	1148	26.1	27.8	1528	1738	145	123	26	30	189	207	163	154
Guadalajara	990	985	21	22.2	1002	1117	164	163	39	42	157	155	200	197
La Experiencia	934	974	21	22.5	1008	1141	163	160	38	41	159	159	201	194
Quito	866	959	21.5	24.8	1038	1380	160	148	51	23	149	189	193	165
Tomatlán	804	913	26.4	29.1	1526	1875	108	103	31	32	221	225	119	115
Promedio	993	996	23.2	25.3	1220	1450	148	139	37	34	175	187	175	165
Varianza	50353	7991	7.805	9.597	78523	118710	558.5	662.3	89.5	63.3	892	914	1226	1121

Pa= precipitación acumulada promedio anual; Ta= temperatura media anual; etpa= Evapotranspiración potencial acumulada promedio anual; H= días húmedos en el año; MS= días medio secos en el año; S= días secos en el año; EC= estación de crecimiento.

Dentro de los casos de variación significativa del valor de la media en sitios de textura fina, sobresalen la temperatura media anual, la ETPa y la longitud de la estación de crecimiento, incrementándose la temperatura 2.5 °C y la ETPa 21%, mientras que la LEC se redujo 10 días al pasar de 1961-1990 a 2040-2069 (Cuadro 5). Para cambio significativo de la varianza se reporta el de días medio secos al pasar de un valor de 173.5 a 784.7; es decir, se tornaría en un parámetro muy cambiante en el futuro (2040-2069), lo cual coincide con reportes previos sobre el incremento del carácter aleatorio de los parámetros de la precipitación y humedad del suelo con la presencia del cambio climático (IPCC, 2007).

which is consistent with previous reports on the increase in randomness of the parameters of precipitation and soil moisture in the presence of climate change (IPCC, 2007).

With regard to cases of significant variation in the average value of medium-textured sites, highlight the Ta, ETPa, MS and LEC, increased 26.6% to the first, the second 2.7 °C, 15% MS decrease and decrease 27% of the LEC. Regarding the variance, significant changes are identified in the LEC with 240% decrease in variance to spend 1961-1990 to 2040-2069. This was due to the decrease of the highest values of LEC (Table 6).

Cuadro 5. Parámetros de humedad del suelo modelados en sitios con textura fina, en dos climatologías: A: 1961-1990; B: 2040-2069.**Table 5. Parameters of modelled soil moisture at sites with fine-textured, two climatologies: A: 1961-1990; B: 2040-2069.**

Estación	Pa (mm)		Ta (°C)		ETPa (mm)		Días húmedos		Días medio secos		Días secos		Longitud de EC	
	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B
Ahualulco	849	967	20.9	23.2	1002	1212	136	141	42	27	182	192	160	160
Antonio Escobedo	966	982	19.4	23.3	921	1212	149	143	67	26	144	191	190	161
Atequiza	836	934	20.3	22.6	967	1149	147	147	33	31	180	182	177	171
Chapala	901	901	20.5	22.5	962	1131	154	149	26	31	180	180	177	173
El Salitre	850	922	20.5	24.25	975	1329	137	132	27	26	196	202	161	149
Etzatlán	1045	1033	20.2	22.7	951	1153	157	147	58	28	145	185	185	165
Jamay	752	866	18.9	22.7	879	1147	146	137	38	38	176	185	184	160
Jocotepec	850	781	19	21.9	878	1079	163	148	60	35	137	148	197	174
La Red	868	971	18.4	21.6	853	1061	164	149	36	139	160	172	197	176
Mezcala	880	809	20	19.3	941	906.2	156	163	43	50	161	147	186	200
Palo Verde	715	894	18.2	21.2	838	1028	156	157	30	42	174	161	186	189
Poncitlán	768	906	19.4	22.7	905	1154	143	142	43	36	174	182	173	164
Presa El Volantín	664	832	17.4	19.8	808	930.6	167	157	38	48	155	155	200	191
San Marcos	1211	1144	22.3	23.8	1090	1254	162	146	39	23	159	191	186	163
Tizapán El Alto	703	836	20	22	938	1088	142	154	36	31	182	175	169	177
Villa Purificación	1416	1743	24.9	27.6	1379	1722	145	142	16	17	199	201	161	153
Promedio	892	970	20	22.6	955	1160	152	147	39	39	169	178	180	170
Varianza	37903	50641	3.082	3.505	17491	34392	95.2	62.78	173.5	784.7	331.6		168.8	195.4

Con relación a los casos de variación significativa del valor de la media en sitios de textura media, destacan la Ta, ETPa, MS y LEC, al incrementarse 26.6% la primera, 2.7 °C la segunda, disminuir 15% MS y disminuir 27% la LEC. Con relación a la varianza, los cambios significativos se identifican en la LEC, con disminución 240% en la varianza al pasar de 1961-1990 a 2040-2069. Esto como resultado de la disminución de los más altos valores de LEC (Cuadro 6).

Al analizar de manera global la información de los Cuadros 4, 5 y 6 se puede además observar que en términos generales el efecto del cambio climático se manifiesta a través de las siguientes tendencias: a) un incremento de precipitación en sitios de textura fina y textura media; b) un incremento de la temperatura en sitios de todo tipo textural; c) un incremento de la evapotranspiración potencial en sitios de todas las clases texturales; d) una disminución del número de días húmedos durante el año en sitios de todos los grupos texturales, siendo más marcada esta tendencia en sitios de textura gruesa; e) un decremento de los días medio secos en el año en sitios de textura gruesa y media; f) un incremento del número de días secos al año en sitios de todos los grupos texturales, siendo más marcada esta tendencia en suelos arenosos y de textura media; y g) una disminución de la longitud de la estación de crecimiento en sitios de todas las clases texturales, siendo más evidente en el caso de la textura media, donde la disminución promedio equivale a 54 días, sobresaliendo los casos de Pihuamo, Santa María de los Ángeles, Tapalpa, Atemajac, Tacotán, San Juan de Potrerros, Corrinchis II, Presa Achimec, El Nogal, Bocas, Mazamitla, San Gaspar de los Reyes, Jilotlán, Colotlán y Ajojúcar con un decremento de la LEC de 129, 116, 116, 115, 114, 95, 93, 93, 86, 83, 76, 75, 69, 66 y 60 días, respectivamente.

When analysing comprehensively the information in Tables 4, 5 and 6 can also be noted that in general the effect of climate change is manifested by the following trends: a) an increase of precipitation in areas of fine texture and texture mean; b) an increase in temperature in all textural type sites; c) increased evapotranspiration potential sites all textural classes; d) a decrease in the number of wet days during the year at all sites textural groups, this trend being more marked in places coarse texture; e) a decrease in the dry half days in the year and a half sites thick texture; f) an increase in the number of dry days per year in sites of all textural groups, this trend being more pronounced in sandy soils of medium texture; g) a decrease in the length of the growing season all sites textural classes, being more evident in the case of medium texture, where the average is equivalent to 54 days, highlighting the cases of Pihuamo, Saint María de los Angeles, Tapalpa, Atemajac, Tacotán, San Juan de Potrerros, Corrinchis II, Presa Achimec, El Nogal, Bocas, Mazamitla, San Gaspar de los Reyes, Jilotlán, Colotlán and Ajojúcar, with a decrease in the LEC 129, 116, 116, 115, 114, 95, 93, 93, 86, 83, 76, 75, 69, 66 and 60 days respectively.

Decreasing of the LEC in the State of Jalisco based on the effects of climate change had already been reported in advance by Ruiz *et al.* (2000) and was attributed by the authors to the combination of a decrease in the precipitation of potential increased temperature due to the increase of evapotranspiration. In the context of this study, the decrease in the LEC explained directly by the decrease in the number of wet days and dry environment and by increasing the number of dry days, and indirectly by increasing the potential evapotranspiration.

Cuadro 6. Parámetros de humedad del suelo modelados en sitios con textura media, en dos climatologías: A: 1961-1990; B: 2040-2069.

Table 6. Parameters of modelled soil moisture at sites with medium texture, two climatologies: A: 1961-1990; B: 2040-2069.

Estación	Pa (mm)		Ta (°C)		ETPa (mm)		Días húmedos		Días medio secos		Días secos		Longitud de EC	
	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B
Acatlán	774	840	20.5	22.7	973	1153	143	161	32	38	185	161	175	140
Ajojúcar	601	578	17.5	21.2	821	1042	154	142	50	35	156	183	200	140
Apazulco	827	863	25.9	28.8	1486	1854	110	105	46	39	204	216	126	80
Atemajac	978	831	16	17.9	754	831.9	251	192	39	51	70	117	280	165
Atotonilco El A.	862	932	19.6	21.5	913	1052	172	176	68	61	120	123	233	196
Bocas	566	664	20.5	23.6	1002	1269	116	105	62	54	182	201	165	82
Cajón de Peña	1142	1235	25.6	28.9	1465	1846	139	127	28	31	193	202	154	117
Casa Llanta	719	776	19.5	22.3	917	1139	145	157	41	34	174	169	186	135
Colotlán	566	743	18.5	22.6	862	1173	135	151	75	33	150	176	192	126

Cuadro 6. Parámetros de humedad del suelo modelados en sitios con textura media, en dos climatologías: A: 1961-1990; B: 2040-2069 (Continuación).**Table 6. Parameters of modelled soil moisture at sites with medium texture, two climatologies: A: 1961-1990; B: 2040-2069 (Continuation).**

Estación	Pa (mm)		Ta (°C)		ETPa (mm)		Días húmedos		Días medio secos		Días secos		Longitud de EC	
	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B
Concepción B.A.	945	987	16.3	18.1	758	837.1	186	212	79	54	95	94	253	217
Corrinchis II	1112	1000	18.8	22.9	872	1176	174	154	59	36	127	170	233	140
Cuitzamala	564	992	25.2	28	1403	1768	65	117	52	33	243	210	75	117
Cuquio	760	912	17.9	20.9	833	1009	170	187	53	44	137	129	223	193
El Chante	878	892	21.9	26.1	1066	1540	148	125	42	31	170	204	173	124
El Nogal	752	896	16	19.2	752	886.1	215	204	60	63	85	93	255	169
El Puesto	565	624	21.5	20.4	1046	974.6	124	164	43	49	193	147	164	154
El Rosario	622	737	25	27.2	1407	1653	92	89	46	50	222	221	126	109
El Zapote	641	736	19.7	22.3	943	1139	141	142	45	41	174	177	186	134
Guachinango	946	923	19.5	21.7	916	1065	166	181	60	32	134	147	226	174
Hostotipaquillo	864	847	21.9	24.6	1051	1364	146	116	30	33	184	211	170	114
Huejúcar	573	704	17.9	20.9	843	1027	145	175	74	41	141	144	195	139
Ixtlahuacán R.	859	868	17.2	21	793	1012	173	171	55	42	132	147	228	162
Jilotlán	897	948	21.4	27.7	1032	1739	159	122	47	17	154	221	188	119
La Cuña	808	842	19.9	21.7	941	1073	148	157	47	58	165	145	190	179
La Huerta	920	1110	25.4	27.8	1448	1735	132	126	24	14	204	220	156	118
La Saucedá	630	663	17.5	21	820	1017	162	165	52	54	146	141	209	185
La Vega	890	966	21.5	23.9	1061	1284	141	159	33	37	186	164	171	137
Lagos de Moreno	606	669	17.6	21.2	824	1028	158	168	52	38	150	154	204	148
Magdalena	922	948	21.1	23.5	1021	1237	139	151	45	36	176	173	169	128
Mazamitla	935	945	16.2	17.3	755	803.6	216	203	57	65	87	92	261	185
Michoacánajo	580	752	17.1	21.3	799	1051	146	171	44	49	170	140	190	144
Paso del 40 II	552	606	17.6	20.7	823	995.2	154	160	43	54	163	146	192	153
Pihuamo	1620	1261	21.4	27.1	115	1668	214	128	45	22	101	210	253	124
Presa Achimec	599	672	18.1	21.3	851	1052	158	155	73	43	129	162	231	138
Presa Hurtado	865	826	19.4	22.6	905	1142	160	159	55	40	145	161	196	140
San Bernardo	549	765	17.9	20.4	839	974.6	142	208	48	55	170	97	190	195
San Gaspar R.	671	788	18	21.8	853	1100	160	168	64	43	136	149	224	149
Sn Juan Potreros	977	646	16	223	754	866.4	177	170	84	48	99	142	255	160
Sta. Ma. Angeles	678	785	18	18.6	849	1130	174	169	78	40	108	151	252	136
Tacotán	835	883	20.4	23.4	962	1217	195	165	57	29	108	166	248	134
Tapalpa	867	817	16	18.8	751	869.3	260	181	37	50	63	129	286	170
Tecolotlán	756	663	22.1	24.9	1096	1396	138	120	46	30	176	210	165	124
Promedio	798	847	19.8	26.6	951	1204	158	155	49	42	153	163	199	145
Varianza	46274	28250	7.68	779.8	54756	83830	1306	850.7	212	132.7	1661	1282	1932	803.8

La disminución de la LEC en el estado de Jalisco por efectos del cambio climático ya había sido reportada de manera previa por Ruiz *et al.* (2000) y fue atribuida por estos autores a la combinación de una disminución de la precipitación con un incremento de la evapotranspiración potencial producto

For coarse textured sites precipitation varies almost did not responded to the average value of the five sites (Table 4); for fine-textured sites (Table 5) and of medium texture (Table 6) increased precipitation on average, but this increase did not offset the increase in the ETP so that the resulting decrease

del incremento de temperatura. En el contexto del presente estudio la disminución en la LEC se explica directamente por la disminución del número de días húmedos y medio secos y por el incremento del número de días secos, e indirectamente por el incremento de la evapotranspiración potencial.

En el caso de los sitios de textura gruesa la precipitación prácticamente no varía atendiendo al valor promedio de los cinco sitios (Cuadro 4); para los sitios de textura fina (Cuadro 5) y de textura media (Cuadro 6) la precipitación se incrementó en promedio, sin embargo este incremento no compensó el incremento en la ETP, por lo que la resultante fue el mencionado decremento de la LEC en los sitios de todas las clases texturales. Al respecto, Chiew *et al.* (1995) mencionan que el cambio en precipitación tiene un efecto menor sobre la humedad del suelo en cuencas húmedas, pero en cuencas secas el porcentaje de cambio en los niveles de humedad del suelo puede ser mayor que el porcentaje de cambio en la lluvia, siendo de gran importancia en suelos arcillosos y delgados.

Izaurrealde *et al.* (2011) mencionan que el incremento de precipitación que puede causar cambio climático, generalmente es acompañado por un incremento en la variabilidad de la lluvia, el cual al interactuar con temperaturas más altas y desecantes, puede conducir a sequías regionales. Esto es lo que al parecer ocurriría en sitios de textura fina, donde la precipitación se incrementaría 8.7% con el cambio climático de 2040-2069, pero la varianza de la precipitación pluvial se incrementaría 33.6%.

Las consecuencias que los cambios discutidos anteriormente podrían traer a los cultivos que actualmente se producen bajo condiciones de temporal en el estado de Jalisco, tienen que ver con un incremento de la tasa de desarrollo debido al incremento de temperatura (Ojeda *et al.*, 2011), un incremento de la demanda hídrica del cultivo por aumento de la evapotranspiración, pero a su vez una posible disminución del requerimiento hídrico del cultivo debido al acortamiento del ciclo de producción por efecto del incremento en la velocidad de desarrollo de la planta (Ruiz *et al.*, 2011).

Los cambios en la longitud de la estación de crecimiento harán necesaria una medida de adaptación consistente en el cambio de variedades de siembra o en el cambio de patrón de cultivos, en sitios donde la disminución de la LEC es muy drástico (Zarazúa *et al.*, 2011).

was mentioned in the LEC at the sites of all textural classes. In this regard, Chiew *et al.* (1995) mentioned that, the change in precipitation has less effect on wet soil moisture basins, but in dry basins percent change in soil moisture levels may be higher than the percentage change in the rain, being of great importance in clay, thin soils.

Izaurrealde *et al.* (2011) mentioned that the increase in precipitation that can cause climate change is usually accompanied by an increase in rainfall variability, which by interacting with higher temperatures and drying can lead to regional drought. This is what seems to happen in fine-textured sites where precipitation would increase 8.7% to climate change from 2040 to 2069, but the variance of rainfall would increase by 33.6%.

The implications of the changes discussed above could bring crops currently produced under rainfed conditions in the State of Jalisco, this have to do with an increase in growth rate due to increased temperature (Ojeda *et al.*, 2011), an increase in water demand of the crop by increased evapotranspiration, but in turn may be diminishing culture water requirement due to shortening of the production cycle the effect of increased rate of plant development (Ruiz *et al.*, 2011).

Changes in the length of the growing season a measure will necessitate adaptation consisting in changing seed varieties or model change crops, in places where the decrease in LEC is quite drastic (Zarazúa *et al.*, 2011).

The increase in the rate of development of the crop and thereby reducing the production cycle shortening directly impact the reproductive phase of crops and therefore in performance (Conde *et al.*, 2006).

Conclusions

Climate change of the 2040-2069 period will impact the soil moisture conditions at sites of all kinds of soil texture. However, the most significant changes were observed in areas of medium texture, followed by fine-textured sites.

Climatic and soil moisture parameters that will be affected with statistical significance of climate change are temperature, potential evapotranspiration and length

El incremento en la tasa de desarrollo del cultivo y en consecuencia la reducción del ciclo de producción, impactará directamente en el acortamiento de la fase reproductiva de los cultivos y por tanto en su rendimiento (Conde *et al.*, 2006).

Conclusiones

El cambio climático del periodo 2040-2069 impactará las condiciones de humedad del suelo en sitios de todas las clases de textura de suelo. Sin embargo, los cambios más significativos se observarán en sitios de textura media, seguidos por sitios de textura fina.

Los parámetros climáticos y de humedad del suelo que serán afectados con significancia estadística por el cambio climático son la temperatura, evapotranspiración potencial y longitud de la estación de crecimiento. Para temperatura y evapotranspiración potencial se identifica una tendencia de incremento, y para la longitud de la estación de crecimiento una tendencia de disminución, infiriéndose que el cambio climático será negativo en cuanto a la disponibilidad de humedad del suelo para la práctica de agricultura.

La disminución en la longitud de la estación de crecimiento guarda correspondencia con la disminución del número de días húmedos y medio secos, y con el incremento del número de días secos en el año.

Literatura citada

- Ines, A. V. M.; Droogers, P. I.; Makin W. and Das Gupta, A. 2001. Crop growth and soil water balance modeling to explore water management options. IWMI Working Paper 22. International Water Management Institute. Colombo, Sri Lanka. 26 P.
- Chiew, F. H. S.; Whetton, P. H.; McMahon, T. A. and Pittock, A. B. 1995. Simulation of the impacts of climate change on runoff and soil moisture in Australian catchments. *J. Hydrol.* 167(1-4):121-147.
- Conde, C.; Ferrer, R. M.; Gay, C. y Araujo, R. 2006. Impactos del cambio climático en la agricultura en México. Cambio climático: una visión desde México. INE México, D. F.
- Eitzinger, J.; Trnka, M.; Hösch, J.; Žalud, Z. and Dubrovský, M. 2004. Comparison of CERES, WOFOST and SWAP models in simulating soil water content during growing season under different soil conditions. *Ecol. Model.* 171:223-246.
- Hatfield, J. L.; Boote, K. J.; Kimball, B. A.; Ziska, L. H.; Izaurralde, R. C.; Ort, D.; Thomson, A. M.; and Wolfe, D. 2011. Climate impacts on agriculture: implications for crop production. *Agron. J.* 103:351-370.

of the growing season. For temperature and potential evapotranspiration an increasing trend is identified, and the length of the growing season a declining trend, inferring that climate change will be negative for the availability of soil moisture for the practice of agriculture.

The decrease in the length of the growing season keeps correspondence with the decrease in the number of wet days and dry environment, and increasing the number of dry days during the year.

End of the English version



- 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, U.K. and U.S.A. 851 p.
- Izaurralde, R. C.; Thomson, A. M.; Morgan, J. A.; Fay, P. A.; Polley, H. W. and Hatfield, J. L. 2011. Climate impacts on agriculture: Implications for forage and rangeland production. *Agron. J.* 103:371-381.
- Kimball, B. A. 2007. Global change and water resources. *In: Lascano, R. J. and Sojka, R. E. (Ed.) Irrigation of agricultural crops.* 2nd edition. ASA, CSSA and SSSA. Madison, WI. *Agron. Monogr.* 30:627-654.
- Newhall, F. and Berdanier, C. R. 1996. Calculation of soil moisture regimes from the climatic record. Soil Survey Investigations, National Soil Survey Center, Natural Resources Conservation Service, Lincoln, NE. Report Núm. 4615 p.
- Ojeda, B. W.; Sifuentes, I. E.; Íñiguez, C. M. y Montero, M. M. J. 2011. Impacto del cambio climático en el desarrollo y requerimientos hídricos de los cultivos. *Agrociencia.* 45: 1-11.
- Ruiz, C. J. A.; Ramírez, D. J. L.; Flores, M. F. J. y Sánchez, G. J. J. 2000a. Cambio climático y su impacto sobre la estación de crecimiento de maíz en Jalisco, México. *Fitotecnia.* 23(2):169-181.
- Ruiz, C. J. A.; Ramírez, D. J. L.; Flores, M. F. J. y Sánchez, G. J. J. 2000b. Cambio climático y efecto sobre las áreas potenciales para maíz en Jalisco, México. *Fitotecnia.* 23(2):183-193.
- Ruiz, C. J. A. 2014. Informe final de proyecto cambio climático y su impacto en el potencial productivo agrícola, forrajero y forestal en México. INIFAP-CIRPAC-C. E. Centro Altos de Jalisco. Tepatitlán de Morelos, Jalisco, México. 90 p.
- Ruiz, C. J. A.; Medina, G. G.; Ramírez, D. J. L.; Flores, L. H. E.; Ramírez, O. G.; Manríquez, O. J. D.; Zarazúa, V. P.; González, E. D. R.; Díaz, P. G. y de la Mora, O. C. 2011. Cambio climático y sus implicaciones en cinco zonas productoras de maíz en México. *Rev. Mex. Cienc. Agríc.* 3(2):309-323.
- Ruiz, C. J. A. y Regalado, R. J. R. 2014. Cambio climático y su impacto sobre la producción de alimentos de origen agrícola. Medio Ambiente. Jalisco en el mundo contemporáneo-aportaciones para una enciclopedia de la época. Universidad de Guadalajara. Guadalajara, Jalisco, México. 3:453-467.

Soil Survey Staff. 1975. Soil Taxonomy. A basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys. USDA, Soil Conservation Service. Agriculture handbook 436. U.S. Government Print. Off. Washington, D. C. USA.

Soil Survey Staff (SSS). 1992. Keys to soil taxonomy. Sixth Edition, 1994. USDA, Soil Conservation Service. Washington, D. C. USA.

Thornthwaite, C. W. 1948. An approach towards a rational classification of climate. *Geographical Review*, 38:55-94.

Zarazúa, V. P.; Ruiz, C. J. A.; González, E. D. R.; Flores, L. H. E. y Ron, P. J. 2011. Impactos del cambio climático sobre la agroclimatología del maíz en la Ciénega de Chapala, Jalisco. *Rev. Mex. Cienc. Agríc.* 3(2):351-363.