

SOFTWARE PARA IDENTIFICAR LAS TENDENCIAS DE CAMBIO CLIMÁTICO A NIVEL LOCAL: UN ESTUDIO DE CASO EN YUCATÁN, MÉXICO

SOFTWARE TO IDENTIFY CLIMATE CHANGE TRENDS AT THE LOCAL LEVEL: A STUDY CASE IN YUCATÁN, MÉXICO

Francisco Bautista¹; Dorian A. Bautista-Hernández¹; Oscar Álvarez¹; María Anaya-Romero²; Diego de la Rosa²¹Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental, Universidad Nacional Autónoma de México. Antigua carretera a Pátzcuaro, núm. 8701, col. Ex Hacienda de San José de la Huerta. C. P. 58190. Morelia, Michoacán, México. Correo-e: leptosol@ciga.unam.mx (Autor para correspondencia).²Evenor Tech, SL, IRNAS-CSIC. Apartado de correos 1052, Avda. Reina Mercedes, 10. 41012-Sevilla, España.

RESUMEN

El presente trabajo muestra la arquitectura y las funcionalidades del software conocido como “Sistema de análisis de datos para el monitoreo regional y local del cambio climático con índices agroclimáticos” Moclic. El software funciona como: a) base de datos, b) herramienta de procesamiento de datos agroclimáticos, y c) herramienta para identificar las tendencias locales del cambio climático. Entre las ventajas de utilizar Moclic se incluye su capacidad para evaluar el cambio climático dentro de una interfaz gráfica de usuario. El software requiere datos de entrada de la estación meteorológica, los cuales contienen la siguiente información: nombre de la estación; número de clave; localidad y estado; promedios mensuales, temperaturas mínimas y máximas, precipitación mensual y coordenadas geográficas de la estación. Con Moclic se pueden procesar los datos de entrada y calcular las variables relacionadas con la evapotranspiración potencial y los índices (anuales y mensuales) de humedad, aridez, estación de crecimiento, concentración de precipitación, erodabilidad y lixiviación del suelo. Moclic funciona tanto en inglés como en español. En este trabajo se presenta un estudio de caso de la Estación de Abalá en el estado de Yucatán, México, para mostrar la aplicabilidad de Moclic a nivel local. Los resultados obtenidos muestran la gran exactitud de este software, para la predicción de las tendencias de cambio climático a lo largo de los últimos 40 años, y sugieren su alto potencial, para que sea utilizado en los nuevos escenarios climáticos.

PALABRAS CLAVE: Índice de humedad, índices climáticos, evapotranspiración, temperatura.

ABSTRACT

The present work shows the architecture and capabilities of the software titled “Data Analysis System for monitoring regional and local climate change with agroclimatic indexes” (Moclic). The software works as: a) a database; b) a processing tool of agroclimatic data; and c) a tool for identifying local climate change trends. The advantages of using Moclic include its capacity for evaluating climate change within a graphical user interface. The software requires input data from weather stations containing the following information: station name, key number, locality and state, monthly average, minimum and maximum temperatures, monthly precipitation and the geographic coordinates of the station. Moclic can process the input data and calculate derived variables related to potential evapotranspiration and monthly and annual indexes for humidity, aridity, the growing season, precipitation concentration, erodibility, and soil leaching. Moclic software works in both English and Spanish. Finally, a case study of the Abalá station in the state of Yucatán, México is presented in order to show the applicability of Moclic at the local level. The results from the case study show the high accuracy of the Moclic for the prediction of climate change trends throughout the last 40 years, and suggest its high potential to be used in new climate scenarios.

KEYWORDS: Humidity index, climatic indexes, evapotranspiration, temperature.



Recibido: 29 de septiembre de 2011
 Aceptado: 14 de enero de 2013
 doi: 10.5154/r.rchscfa.2011.09.073
<http://www.chapingo.mx/revistas>

INTRODUCCIÓN

En todo el mundo se está llevando a cabo un enorme esfuerzo tecnológico y de investigación para predecir el impacto y las tendencias futuras del cambio climático global (Gay & Estrada, 2010; Shahbazi et al., 2009; Walker & Schulze, 2008; Wigley, 2008). Este conocimiento es importante para la adopción de medidas preventivas y de mitigación, así como de estrategias de adaptación en ambientes urbanos y rurales. Existen varios modelos para el estudio del cambio climático y la variabilidad. Estos modelos son utilizados para realizar proyecciones cuantitativas de cambios climáticos a largo plazo. Los modelos toman en cuenta los siguientes tres aspectos: a) el desarrollo socioeconómico y la capacidad de adaptación, b) los datos históricos de los elementos climáticos de las estaciones meteorológicas, c) los datos de referencia y las proyecciones para la concentración global promedio de CO₂, el ascenso del nivel del mar a nivel regional y global, la concentración de ozono troposférico a nivel regional, la concentración de sulfatos en aerosol y la deposición de sulfuros. La predicción del cambio climático se puede expresar en distintas escalas de tiempo, en una escala global y regional (Carter, 2007). Muchos investigadores mexicanos (Conde, Estrada, Martínez, Sánchez, & Gay, 2011) y de otras partes del mundo utilizan estos modelos para desarrollar los escenarios relacionados con los cambios en las especies y en los ecosistemas (Gómez et al., 2011), en los agroecosistemas (Villers, Arizpe, Orellana, Conde, & Hernández, 2009), en la producción y salud animal (Monterroso et al., 2011), y en los aspectos ambientales (García-Herrera et al., 2009). En México, los gobiernos estatales y municipales están formulando políticas públicas para mitigar los cambios causados por el calentamiento global; sin embargo, el establecer las políticas de adaptación al cambio climático requiere de una previsión detallada de éste, tomando en cuenta la diversidad regional y local, así como, un análisis de la magnitud y dirección de los principales parámetros climáticos. Los modelos locales carecen del nivel de detalle necesario para un análisis local, lo que requiere de esfuerzos adicionales para alcanzar escenarios más específicos (regionales y locales) del cambio climático.

Las bases de datos climáticos, que contienen registros de por lo menos 50 años, son excelentes fuentes de información histórica. Estas pueden ser utilizadas para analizar los cambios de los distintos elementos del clima e índices, a lo largo del tiempo, por ejemplo, para la generación de evidencia local del cambio climático en distintas escalas, así como para entender mejor el comportamiento del clima y sus consecuencias en condiciones agronómicas, ecológicas, bióticas y ambientales. La identificación de las tendencias climáticas requiere el manejo de grandes bases de datos, las cuales contienen décadas de información acerca de los elementos climáticos; por esta razón y para un mejor manejo de información se creó el software Moclic. El predecesor de Moclic es el software CDBm (base de datos climáticos mensuales) (De la Rosa,

INTRODUCTION

An enormous technological and research effort is being carried out worldwide to predict the impact and future trends of global climate change (Gay & Estrada, 2010; Shahbazi et al., 2009; Walker & Schulze, 2008; Wigley, 2008). This knowledge is crucial for the adoption of both preventive and mitigating measures and of adaptive strategies in urban and rural environments. There for a number of models for studying climate change and variability. These models are used to make quantitative projections of future climate changes in the long term. The models take into account three aspects: a) socio-economic development and adaptation capacity, b) historic data of climate elements from weather stations, and c) baseline data and projections for global mean CO₂ concentration, global and regional sea-level rise, regional ground-level ozone concentration, sulphate aerosol concentration and sulphur deposition. The predictions of climate change can be expressed on different time scales in a global and regional scale (Carter, 2007). Many researchers in México (Conde, Estrada, Martínez, Sánchez, & Gay, 2011) and around the world use these models to develop scenarios related to changes in species and ecosystems (Gómez et al., 2011), in agroecosystems (Villers, Arizpe, Orellana, Conde, & Hernández, 2009), in both production and animal health (Monterroso et al., 2011), and in environmental aspects (García-Herrera et al., 2009). In México, state and municipal governments are formulating public policies to mitigate the changes caused by global warming. However, establishing climate change adaptation policies requires a detailed climate change prevision, taking into account regional and local diversity and an analysis of the magnitude and direction of the main climate parameters. Global models lack the needed detail level for local analysis, necessitating additional efforts towards achieving more specific regional and local scenarios of climate change.

Climate databases containing records of at least 50 years are excellent sources of historical information that can be used for analyzing the changes through time of the diverse climate elements and indexes, i.e., for the generation of local evidence of climate change at different scales, as well as for better understanding the climate's behavior and its consequences in agronomical, ecological, biotic and environmental terms. Identifying climate change trends requires managing large databases containing decades of information about weather elements; for that reason and for an efficient management of information, the Moclic software was created. The predecessor of Moclic is the CDBm (monthly Climate Database) software (De la Rosa, Barros, Mayol, & Moreno, 1996). Both Moclic and CDBm allow for the calculation of agroclimatic indices used for land evaluation. However, CDBm was written in MS-DOS, which makes data management tedious because data need to be entered one at a time, thus impeding the calculation of monthly humidity indexes and the modification of reference evapotranspiration equations (ET₀). In addition, it is not possible to identify the change trends by means of climate elements and ag-

Barros, Mayol, & Moreno, 1996). Tanto Moclic como CDBm permiten el cálculo de los índices agroclimáticos utilizados para la evaluación de las tierras. No obstante, el software CDBm se desarrolló en MS-DOS, lo que hace que el manejo de datos sea tedioso, ya que los datos se deben ingresar uno por uno, además no es posible el cálculo de los índices de humedad mensual y la modificación de las ecuaciones de evapotranspiración de referencia (ET_0). Además, en CDBm no es posible identificar las tendencias de cambio mediante los elementos del clima y los índices agroclimáticos, lo que es de gran importancia a nivel local. CDBm no fue creado para evaluar el cambio climático, y por ello se desarrolló el software Moclic. En este contexto, el presente estudio tiene dos objetivos: a) describir la estructura de Moclic y b) describir la función de Moclic utilizando un estudio de caso de Yucatán, México.

MATERIALES Y MÉTODOS

Diseño del software

El software Moclic fue diseñado utilizando la arquitectura .NET, con el lenguaje de programación Visual Basic 2005 y el .NET framework 2.0, ambos de Microsoft. La base de datos utiliza Microsoft SQLServer Express 2005. Moclic funciona con las siguientes plataformas: Microsoft Windows XP, Windows Vista, y Windows 7. Su implementación requiere de la instalación previa de dos componentes: sql-server express 2005 y framework 2.0. El software funciona como una base de datos y como un procesador de información. Los datos de entrada son los datos de la estación meteorológica, incluyendo el nombre, el número de clave, la localidad y el estado, el promedio mensual, las temperaturas mínimas y máximas ($^{\circ}C$), la precipitación mensual (mm) y las coordenadas geográficas (grados, minutos y segundos) de la estación. La captura de los datos se puede realizar por año o por periodos de varios años, sólo se tienen que copiar los datos (normalmente de hojas de cálculo de Excel) y se pegan en Moclic. El proceso de cálculo de los índices agroclimáticos está incluido en el software. Los índices agroclimáticos son:

a) El índice de humedad (Hui), mensual y anual, el cual se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$Hui = P/ET_0$$

Donde:

P = precipitación anual o mensual (mm)

ET_0 = evapotranspiración anual o mensual (mm).

El valor de HUi tiene seis categorías: hiperárido < 0.05; árido 0.05 < 0.2; semiárido 0.2 < 0.50; subhúmedo seco 0.50 < 0.65; subhúmedo húmedo 0.65 < 1; y húmedo > 1 (Lobo et al., 2004).

roclimatic indexes in CDBm, which is of utmost relevance at the local level. CDBm was not created for evaluating climate change, which is why the Moclic software was developed. In this context, this study has two aims: a) describe the Moclic structure and b) describe Moclic function using a case study of Yucatán, México.

MATERIALS AND METHODS

Software Design

Moclic software was designed using the .NET architecture, with the programming language Visual Basic 2005 and the .NET framework 2.0, both from Microsoft. The database uses Microsoft SQLServer Express 2005. Moclic runs on the following platforms: Microsoft Windows XP, Windows Vista, and Windows 7. Its implementation requires prior installation of two components: sqlserver express 2005 and framework 2.0. The software works as a database and as an information processor. Input data are weather station data including its name, key number, locality and state, monthly mean, minimum and maximum temperatures ($^{\circ}C$), monthly precipitation (mm) and the geographic coordinates (grades, minutes and seconds) of the station. Data capturing can be done annually or within several years by simply copying the data (typically from Excel spreadsheets) and pasting them in Moclic. The calculation process of agroclimatic indices was included in the software. The agroclimatic indexes are:

a) Humidity index (HUi), monthly or annual is calculated by the following equation:

$$Hui = P/ET_0$$

Where:

P = monthly or annual precipitation (mm)

ET_0 = monthly or annual evapotranspiration (mm).

The value of the HUi has six categories: hyperarid < 0.05; arid 0.05 < 0.2; semiarid 0.2 < 0.50; dry subhumid 0.50 < 0.65; humid subhumid 0.65 < 1; and humid > 1 (Lobo et al., 2004).

b) The aridity index (ARi) is calculated as a function of the number of months in a year in which ET_0 exceeds precipitation.

c) Growing season (GS) is determined by estimating the number of months in the year in which the average temperature exceeds $5^{\circ}C$ (Commission of the European Communities [CEC], 1992). This index is commonly used in cold climate regions.

d) Precipitation concentration (PCi) is calculated by the formula of Oliver (1980), who proposed this index as an estimate of the aggressiveness of rainfall from the variation along time of monthly precipitations, expressed as a percentage:

$$PC_i = 100 * \Sigma(p^2/P^2)$$

b) El índice de aridez (ARi), el cual se obtiene como una función del número de meses en un año, en el que ET_0 excede de la precipitación.

c) La estación de crecimiento (ES), la cual se determina al estimar el número de meses en el año en el que la temperatura promedio sobrepasa los 5 °C (Comisión de las Comunidades Europeas [CCE], 1992). Este índice se utiliza comúnmente en regiones de clima frío.

d) La concentración de precipitación (PCi), la cual se obtiene mediante la fórmula de Oliver (1980), quien propuso este índice como una estimación de la agresividad de la precipitación, a partir de la variación, a lo largo de las precipitaciones mensuales expresadas como un porcentaje:

$$PC_i = 100 * \Sigma(p^2/P^2)$$

Donde:

p = precipitación mensual (mm)

P = precipitación anual (mm)

d) El índice modificado de Fournier (MFi) se utiliza frecuentemente para evaluar la erosividad del suelo (factor R), fue definido como un índice anual por Arnoldus (1980) y se obtiene de la siguiente manera:

$$MF_i = \Sigma(p^2/P)$$

Donde:

p = precipitación mensual (mm)

P = precipitación anual (mm)

e) La lixiviación del suelo de Arkley (AKi) se utiliza para estimar los efectos del clima en el proceso de la lixiviación del suelo. Arkley (1963) definió AKi como un índice anual calculado mediante el valor más alto de la suma de las precipitaciones mensuales, menos el ET_0 de los meses en que la precipitación es mayor que la evapotranspiración, o mediante la cantidad de precipitaciones que ocurren durante el mes más húmedo.

Dos pruebas están incluidas en el software Moclic: la correlación simple y la prueba de Mann-Kendall (MK-T). El análisis de correlación se puede utilizar como un enfoque inicial para identificar los cambios lineales de los parámetros climáticos y los índices agroclimáticos. MK-T es una prueba estadística no paramétrica utilizada para identificar las tendencias no lineales en intervalos de tiempos iguales en un conjunto de datos y, en este caso, los elementos del clima y los índices agroclimáticos pueden tener una distribución anormal (Carlón & Mendoza, 2007).

El estudio de caso ejemplificando el uso del software Moclic

Para el estudio de caso, se seleccionaron datos provenientes de la estación meteorológica de Abalá, en el estado de Yuca-

Where:

p = monthly precipitation (mm)

P = annual precipitation (mm)

d) The modified Fournier index (MFi) is frequently used for assessing the rainfall erosivity of soil (factor R). As an annual index, it was defined by Arnoldus (1980) and is calculated as follows:

$$MF_i = \Sigma(p^2/P)$$

Where:

p = monthly precipitation (mm)

P = annual precipitation (mm)

e) Arkley's soil leaching (AKi) is used to estimate the effects of climate on the process of soil leaching. Arkley (1963) defined AKi as an annual index calculated by the higher value of the sum of monthly precipitations minus the ET_0 of months in which precipitation is larger than evapotranspiration or by the amount of precipitation occurring during the most humid month.

In Moclic we included two tests: simple correlation and Mann-Kendall test (MK-T). Correlation analysis can be used as an initial approach to identify lineal changes of climate parameters and the agroclimatic indexes. The MK-T is a non-parametric statistical test used for identification of non-linear trends at equal time intervals in a data set and, in this case, the climate parameters and agroclimatic indexes can have non-normal distribution (Carlón & Mendoza, 2007).

Case study exemplifying the use of Moclic

For the case study we selected data from the Abalá weather station located in the state of Yucatán, México. A data set from 1968 to 2006 consisted of monthly means of temperature, maximum temperature, minimum temperature and precipitation. The data set used was generated by the Mexican National Water Commission. We use the new constants recalibrated for the Hargreaves-Samani equation to calculate the ET_0 (Bautista, Bautista-Hernández, & Delgado-Carranza, 2009). The handling and processing of data from weather parameters was performed with the Moclic software.

RESULTS AND DISCUSSION

Moclic is a computer-based tool for the organization, storage, and manipulation of agroclimatic data for land evaluation and for identification of local climate change trends. Moclic works both as a monthly climate database and as a data processing system. Its function as a database allows for organizing and managing monthly data in annual time se-

tán, México. El conjunto de datos pertenece al periodo 1969 a 2006 y consta de promedios mensuales de temperatura, temperatura máxima, temperatura mínima y precipitación. La Comisión Nacional del Agua fue la encargada de generar este conjunto de datos. Las nuevas constantes recalibradas para la ecuación de Hargreaves y Samani fueron utilizadas para calcular el ET_0 (Bautista, Bautista-Hernández, & Delgado-Carranza, 2009). El manejo y proceso de los datos de los parámetros climáticos se realizó con el software Moclic.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Moclic es una herramienta informática para organizar, almacenar y manipular datos agroclimáticos para la evolución de tierras e identificar las tendencias locales del cambio climático. Moclic funciona como una base de datos climáticos mensuales, así como un sistema para procesar datos. Su función como base de datos permite organizar y manejar datos mensuales, en series de tiempo (anuales), de las estaciones climáticas organizadas por estado. Esto permite estandarizar los datos, con el fin de evitar que la información se duplique y se intercambien datos entre las distintas agencias internacionales relacionadas con el clima y la planeación del uso de la tierra. Moclic es fácil de usar para el análisis climático, ya que ofrece una interfaz gráfica con una serie de ventanas e iconos.

Como sistema de procesamiento de información, el software Moclic procesa los datos de entrada, tanto para calcular la evapotranspiración potencial y los índices agroclimáticos, como para identificar las tendencias de cambio climático local mediante los índices agroclimáticos y los elementos del clima. Para facilidad del cálculo de ET_0 se incluyeron las ecuaciones para calcular la radiación extraterrestre y las horas de luz solar considerando las coordenadas geográficas (Bautista et al., 2009). El software Moclic procesa los datos climáticos mediante las ecuaciones y los índices descritos a continuación.

Los datos de salida son la información de la estación, valores de ET_0 en $\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$ y $\text{mm}\cdot\text{mes}^{-1}$, utilizando el método de Thornthwaite (1948) (ET_0 -TM) y el método de Hargreaves & Samani (1985) (ET_0 -HM). ET_0 también se puede obtener mediante las ecuaciones tradicionales o las modificaciones locales formuladas por el procedimiento de Bautista et al. (2009). Es posible exportar algunos parámetros como año, número de mes, temperatura máxima, temperatura promedio, temperatura mínima, precipitación, radiación solar, y horas de luz solar. Otras variables de salida son los índices de humedad (HUi), ARi, EC, PCi, MFi y AKi mensuales y anuales. El software Moclic calcula ET_0 en distintas escalas de tiempo: diariamente, promediados por mes, promediados mensual y anualmente para el número de años analizados. Al calcular los índices agroclimáticos se mostrarán de forma tabular para un periodo en la estación seleccionada, y el usuario puede elegir si los calcula utilizando el método de Hargreaves y Samani o el método de Thornthwaite, o

ries by weather stations organized by state. This allows for standardizing the data in order to avoid duplicate information and to exchange data between different international agencies related with climate and land use planning. Moclic for climate analysis is user friendly, offering a graphical interface with a series of windows and icons.

As a climate information processing system, Moclic processes the input data both for computing the potential evapotranspiration and agroclimatic indexes and for identifying trends of local climate changes by means of agroclimatic indexes and climate elements. For easiness of calculation of ET_0 , equations were included to calculate extraterrestrial radiation and hours of sunlight from geographic coordinates (Bautista et al., 2009). Moclic processes climate data by the equations and indexes described below.

Output values are station data, additional data used for calculation of ET_0 in $\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$ and $\text{mm}\cdot\text{month}^{-1}$ using both the methods of Thornthwaite (1948) (ET_0 -TM) and Hargreaves & Samani (1985) (ET_0 -HM). ET_0 can be calculated by the traditional equations or by local modifications made by the procedure of Bautista et al. (2009). Some parameters can also be exported as year, month number, maximum temperature, mean temperature, minimum temperature, precipitation, solar radiation, and hours of sunlight. Other output variables are monthly and annual index of humidity (HUi), ARi, GS, PCi, MFi and the AKi. Moclic calculates ET_0 in different scales of time: daily, averaged per month, monthly averaged and yearly averaged for the number of years analyzed. Using the tab indexes, the agroclimatic indexes for the time period in the selected station are displayed in tabular form, and the user can choose to calculate them by the methods of Hargreaves-Samani or Thornthwaite, or both. In addition, graphs can be generated with climate elements and the generated indexes. The monthly and annual graph tab plots the graphs for the period of years analyzed of the following monthly data averages: maximum, mean and minimum temperature ($^{\circ}\text{C}$), precipitation (mm), ET_0 -TM ($\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$) and ET_0 -HM ($\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$). Moclic Software can be improved in all aspects, including agroclimatic indexes, trend analysis techniques, and the import and export data.

The software has the advantage of deploying thousands of data in a single graph, which can identify data errors or seasonality. For the study case however, we did not find these errors. The software will be a free download at www.ciga.unam.mx

The trends of decreasing temperature identified in the study case are seemingly contrary to what is commonly expected, thereby generating negative criticism of the original data, the software, and the results; the latter are striking: the site is cooling. Preliminary results with data from other weather stations show that is possible to find locations that are heating, cooling or where there is no apparent change, which suggests the need to assess every weather station in a given

ambos. Por otra parte, las gráficas se pueden generar con los elementos del clima y los índices. Las gráficas mensuales y anuales representan las gráficas para el periodo de años analizados de los siguientes datos mensuales: temperatura mínima, media y máxima ($^{\circ}\text{C}$), precipitación (mm), $\text{ET}_0\text{-TM}$ ($\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$) y $\text{ET}_0\text{-HM}$ ($\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$). El software Moclic se puede mejorar en todos los aspectos, incluyendo los índices agroclimáticos, las técnicas de análisis de tendencias, y los datos de importación y exportación.

Este software tiene la ventaja de desplegar miles de datos en una sola gráfica e identificar errores de datos o de estacionalidad. Sin embargo, para el caso de estudio no se encontraron errores. El software se podrá descargar gratuitamente del sitio www.ciga.unam.mx

Las tendencias de la disminución de la temperatura, identificada en el caso de estudio, son aparentemente contrarias a lo que comúnmente se espera, generando una crítica negativa sobre los datos originales, el software, y los resultados; estos últimos son notables: el sitio se está enfriando. Los resultados preliminares junto con los datos de otras estaciones climáticas muestran que es posible encontrar lugares que se están calentando, enfriando o donde no hay ningún cambio aparente, lo que indica la necesidad de evaluar todas las estaciones meteorológicas en una región determinada para obtener mejores conclusiones a nivel local.

region for better conclusions at the local level.

In the data from the Abalá weather station, there is a clear trend of change in annual average temperatures, partial correlation for maximum annual temperature and a good correlation in the case of average and minimum annual temperatures. There is a continuous and decreasing trend of change over time in maximum, mean and minimum annual temperatures, at magnitudes of 2.5, 3.5, and 5.0 $^{\circ}\text{C}$, respectively (Figure 1). The monthly maximum temperature had r values from -0.14 to -0.57; partial linear correlations were obtained for January to December (Table 1). The Mann-Kendall test (MK-T) indicates that there is a changing trend towards lower values of the maximum temperature in January, February, April, June, July, August, November and December.

The mean monthly temperature displayed r values over time ranging from -0.76 to -0.54, so we can observe that there is a tendency of linear change and that the correlation was found in the months of January, April, July, September, October and December (Figure 2). Partial correlation values were obtained in February, March, May, June, August and November. The MK-T indicates that in each month there is a changing trend towards lower values of maximum temperature. The linear correlation values over time for the monthly minimum temperature were low in May, June and November, while in the remaining months the linear correlation was partial. With the MK-T, a trend

CUADRO 1. Tendencias de cambio climático en Abalá, Yucatán, México, utilizando el coeficiente de correlación lineal y la prueba de Mann-Kendall.

Mes	Temperatura máxima ($^{\circ}\text{C}$)		Temperatura media ($^{\circ}\text{C}$)		Temperatura mínima ($^{\circ}\text{C}$)		Precipitación (mm)	$\text{ET}_0\text{-HM}$ ($\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$)
	r	Z	r	Z	r	Z	Z	r
E	-0.47	-3.03	-0.75	-4.95	-0.62	-3.91	-1.78	-0.37
F	-0.40	-2.86	-0.54	-3.51	-0.53	-3.57	-1.42	-0.20
M	-0.28	-1.75	-0.64	-4.04	-0.56	-3.59	0.97	-0.00
A	-0.36	-2.11	-0.72	-4.88	-0.65	-4.26	1.59	-0.00
M	-0.32	-1.73	-0.68	-4.33	-0.26	-1.79	0.10	-0.35
J	-0.37	-2.40	-0.69	-4.31	-0.32	-3.17	-0.06	-0.26
J	-0.35	-2.12	-0.74	-4.62	-0.70	-5.06	0.48	-0.14
A	-0.44	-2.41	-0.63	-4.61	-0.57	-3.45	-1.52	-0.14
S	-0.14	-0.88	-0.70	-4.48	-0.68	-4.48	-0.39	-0.20
O	-0.26	-1.13	-0.72	-4.46	-0.57	-3.33	-0.15	-0.00
N	-0.39	-2.34	-0.62	-3.93	-0.40	-2.42	0.34	-0.26
D	-0.57	-4.13	-0.72	-4.88	-0.51	-3.70	0.38	-0.48

r = coeficiente de correlación lineal, Z = valor de la prueba del modelo de Mann-Kendall, HM = Hargreaves

TABLE 1. Climate change trends using the linear correlation coefficient and the Mann-Kendall test from Abalá, Yucatán, México.

Month	Maximum temperature (°C)		Medium temperature (°C)		Minimum temperature (°C)		Precipitation (mm)	ET ₀ -HM (mm·d ⁻¹)
	r	Z	r	Z	r	Z	Z	r
J	-0.47	-3.03	-0.75	-4.95	-0.62	-3.91	-1.78	-0.37
F	-0.40	-2.86	-0.54	-3.51	-0.53	-3.57	-1.42	-0.20
M	-0.28	-1.75	-0.64	-4.04	-0.56	-3.59	0.97	-0.00
A	-0.36	-2.11	-0.72	-4.88	-0.65	-4.26	1.59	-0.00
M	-0.32	-1.73	-0.68	-4.33	-0.26	-1.79	0.10	-0.35
J	-0.37	-2.40	-0.69	-4.31	-0.32	-3.17	-0.06	-0.26
J	-0.35	-2.12	-0.74	-4.62	-0.70	-5.06	0.48	-0.14
A	-0.44	-2.41	-0.63	-4.61	-0.57	-3.45	-1.52	-0.14
S	-0.14	-0.88	-0.70	-4.48	-0.68	-4.48	-0.39	-0.20
O	-0.26	-1.13	-0.72	-4.46	-0.57	-3.33	-0.15	-0.00
N	-0.39	-2.34	-0.62	-3.93	-0.40	-2.42	0.34	-0.26
D	-0.57	-4.13	-0.72	-4.88	-0.51	-3.70	0.38	-0.48

r = lineal correlation coefficient, Z = value of Mann-Kendall test, HM = Hargreaves model

En los datos de la estación meteorológica de Abalá existe una clara tendencia de cambio en la temperatura promedio anual, una correlación parcial para la temperatura máxima anual y una correlación buena, en el caso de la temperatura mínima y promedio anual. Existe una tendencia de cambio continuo y decreciente, a lo largo del tiempo, en la temperatura anual mínima, media y máxima, en magnitudes de 2.5, 3.5, y 5.0 °C, respectivamente (Figura 1). La temperatura máxima mensual tiene valores r de -0.14 a -0.57; se obtuvieron correlaciones lineales parciales de enero a diciembre (Cuadro 1). La prueba MK-T indica que existe una tendencia de cambio hacia la reducción de los valores de la temperatura máxima en enero, febrero, abril, junio, julio, agosto, noviembre y diciembre. La temperatura media mensual mostró valores r, a lo largo del tiempo, que van de -0.76 a -0.54, por lo que se puede observar que existe una tendencia de cambios lineales. La correlación se encontró en los meses de enero, abril, julio, septiembre, octubre y diciembre (Figura 2). Los valores de correlación parcial se obtuvieron en febrero, marzo, mayo, junio, agosto y noviembre. La MK-T indica que en cada mes existe una tendencia de cambio hacia la reducción de los valores de la temperatura máxima. Los valores de correlación lineal, a lo largo del tiempo, para la temperatura mínima mensual son bajos en mayo, junio y noviembre, mientras que para el resto de los meses la correlación fue parcial. Con la prueba MK-T se identificó una tendencia de cambio hacia una disminución de la temperatura en todos los meses, excepto en mayo. Ningún mes presentó tendencias de cambio en la precipitación mensual ni en la evapotranspiración potencial mensual.

of change was identified in all months except May, the trend of change being towards a decrease in minimum temperature. Monthly rainfall and monthly potential evapotranspiration did not show change trends in any month.

CONCLUSIONS

Moclic is a tool that allows both storing georeferenced climate data and the analysis of thousand of data in a friendly and fast way. Weather data must be imported, reviewed and analyzed carefully based on a regional approach. On the other hand, it is well known that the tendency of global climate change is towards heating due to greenhouse gas emissions. However, in regional and local scales, other causes are at work. Therefore, the trends can be of three types: to heating, cooling or no apparent change. In the study case, in Abalá, Yucatán, México, climate change trends were found in maximum, mean and minimum temperatures. There is a trend towards a decrease in temperature over the years. The months in which the linear correlation coefficient is higher in mean temperature are January, April, October and December. On the other hand, we found a change trend in maximum and minimum temperatures for most months of the year by means of the MK-T statistic. However, it is necessary to take into account that the changing trends in Abalá are only for the period of years studied and that these trends could be part of the cyclical variation in a larger time interval.

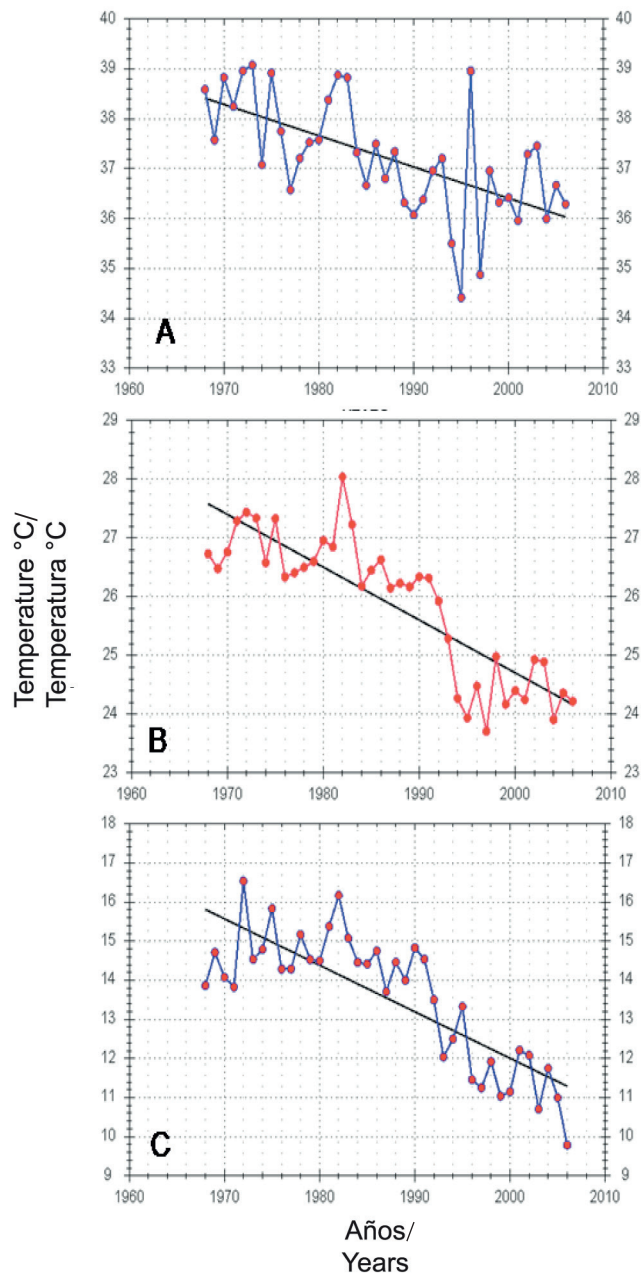


FIGURA 1. Comportamiento anual de la temperatura durante el periodo de estudio (1968 a 2006) en Abalá, Yucatán, México. A) Promedio de la temperatura máxima anual ($r = -0.62$), B) Promedio de la temperatura media anual ($r = -0.85$), C) Promedio de la temperatura mínima anual ($r = -0.81$).

FIGURE 1. Annual behavior of temperature during the study period (1968 to 2006) in Abalá, Yucatán, México. A) Average annual maximum temperatures ($r = -0.62$), B) Average annual medium temperatures ($r = -0.85$), C) Average annual minimum temperatures ($r = -0.81$).

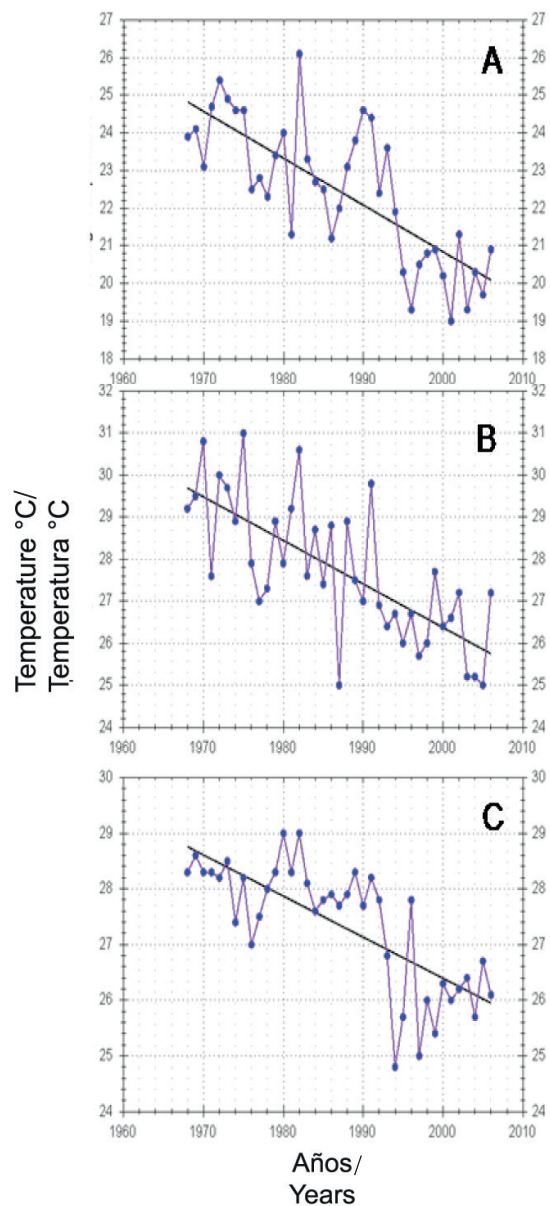


FIGURA 2. Tendencias de cambio en la temperatura media anual para enero (A, $r = -0.75$), abril (B, $r = -0.72$) y julio (C, $r = -0.74$).

FIGURE 2. Trends of change in annual mean temperature for January (A, $r = -0.75$), April (B, $r = -0.72$) and July (C, $r = -0.74$).

ACKNOWLEDGMENTS

To CONACYT for supporting the projects YUC-2006-C05-66159 and 090315. To Dr. Manuel Mendoza for support on the module Kendall and two anonymous referees for their comments to the previous version.

End of English Version

CONCLUSIONES

El software Moclic es una herramienta que permite, de manera rápida y sencilla, el almacenamiento de datos climáticos georeferenciados y el análisis de miles de ellos. Los datos climáticos se deben importar, revisar y analizar cuidadosamente basándose en un enfoque regional. Por otro lado, se sabe que la tendencia de cambio climático global va hacia el calentamiento, debido a las emisiones de gases de efecto invernadero; sin embargo, en escalas regionales y locales, otras causas pueden estar presentes. Por tanto, las tendencias pueden ser de tres tipos: tendencia al calentamiento, al enfriamiento y sin cambios aparentes. En el caso de estudio, en Abalá, Yucatán, México, las tendencias de cambio climático se encuentran en temperaturas máximas, medias y mínimas. Existe una tendencia hacia la disminución de la temperatura a lo largo de los años. El coeficiente de correlación lineal en la temperatura media es más alto en enero, abril, octubre y diciembre. Por otra parte, se encontró una tendencia de cambio hacia la disminución en la temperatura máxima y mínima para la mayoría de los meses del año, mediante la prueba estadística de MK-T. Sin embargo, es necesario tomar en cuenta que las tendencias de cambio en Abalá son sólo para un periodo de años estudiados, y que estas tendencias podrían ser parte de la variación cíclica en un intervalo mayor de tiempo.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a CONACYT por el apoyo para la realización de los proyectos YUC-2006-C05-66159 y 090315. Asimismo, agradecemos al Dr. Manuel Mendoza por el apoyo en el módulo para Kendall y a los dos árbitros anónimos por sus comentarios realizados a la versión anterior.

REFERENCES

- Arnoldus, H. M. J. (1980). An approximation of the rainfall factor in the universal soil loss equation. In M. de Boodt & D. Gabriels (Eds.), *Assessment of erosion* (pp. 127–132). Chichester, England: John Wiley & Sons, Inc.
- Arkley, R. (1963). Relationships between plant growth and transpiration. *Hilgardia*, 34, 559–584. Obtenido de <http://www.jstor.org/stable/2473993>
- Bautista, F., Bautista-Hernández, D., & Delgado-Carranza, C. (2009). Calibration of the equations of Hargreaves and Thornthwaite to estimate the potential evapotranspiration in semi-arid and subhumid tropical climates for regional applications. *Atmósfera*, 22, 331–348. Obtenido de <http://www.revistas.unam.mx/index.php/atm/article/view/8635>
- Carlón, T., & Mendoza, M. (2007). Análisis hidrometeorológico de las estaciones de la cuenca del Lago de Cuitzeo. *Investigaciones Geográficas*, 63, 56–76. Obtenido de <http://www.revistas.unam.mx/index.php/rig/article/view/29910>
- Carter, T. R. (2007). *General guidelines on the use of scenario data for climate impact and adaptation assessment*. Helsinki, Finland: Intergovernmental Panel on Climate Change, Task Group on Data and Scenario Support for Impact and Climate Assessment (IPCC-TGICA). Obtenido de http://www.ipcc-data.org/guidelines/TGICA_guidance_sdciaa_v2_final.pdf
- Commission of the European Communities (CEC). (1992). *CORINE soil erosion risks and important land resources in the southern regions of the European Community*. Obtenido de <http://www.eea.europa.eu/publications/COR0-soil>
- Conde, C., Estrada, F., Martínez, B., Sánchez O., & Gay, C. (2011). Regional climate change scenarios for México. *Atmósfera*, 24, 125–140. Obtenido de <http://www.revistas.unam.mx/index.php/atm/article/view/23806>
- De la Rosa, D., Barros, J., Mayol, F., & Moreno, J. (1996). CDMm Base de datos climáticos mensuales. Sevilla, España: Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Instituto de Recursos Naturales y Agrobiología. Obtenido de <http://www.MicroLEIS.ExplorandolosLímitesAgroecológicosdelaSostenibilidad>
- García-Herrera, G., Esquivel, G., Zárate, J. L., Trejo, R., Sánchez, I., & Esquivel, O. (2009). Escenarios a futuro de temperatura y precipitación pluvial bajo el efecto de un cambio climático en la región agrícola de los llanos, Durango, México. *Revista Chapingo Serie Zonas Áridas*, 9, 107–120. Obtenido de http://www.chapingo.mx/revistas/zonas_aridas/contenido.php?anio=2010&v ol=IX&num=2&id_rev=8
- Gay, C., & Estrada, F. (2010). Objective probabilities about future climate are a matter of opinion. *Climate Change*, 99, 27–46. doi: 10.1007/s10584-009-9681-4
- Gómez, J. D., Monterroso, A., Tinoco, J. A., Toledo, M. L., Conde, C., & Gay, C. (2011). Assessing current and potential patterns of 16 forest species driven by climate change scenarios in México. *Atmósfera*, 24, 31–52. Obtenido de <http://www.revistas.unam.mx/index.php/atm/article/view/23801>
- Hargreaves, G. H., & Samani, Z. A. (1985). Reference crop evapotranspiration from temperature. *Applied Engineering in Agriculture*, 1, 96–99. Obtenido de <https://elibrary.asabe.org/abstract.asp?aid=26773&t=2&redir=&redirType=>
- Lobo, D., Gabriels, D., Ovalles, F., Santibañez, F., Moyano, M. C., Aguilera, R.,...Urra, N. (2004). *Guía metodológica para la elaboración del mapa de zonas áridas, semiáridas y subhúmedas secas de América Latina y el Caribe*. Caracas, Venezuela: CAZALAC- PHI/UNESCO.
- Monterroso, A. I., Gómez, J. D., Toledo, M. L., Tinoco, J. A., Conde, C., & Gay, C. (2011). Simulated dynamics of net primary productivity (NPP) for outdoor livestock feeding coefficients driven by climate change scenarios in México. *Atmósfera*, 24, 69–88. Obtenido de <http://www.revistas.unam.mx/index.php/atm/article/view/23803>
- Oliver, J. E. (1980). Monthly precipitation distribution: A comparative index. *Professional Geographer*, 32, 300–309. doi: 10.1111/j.0033-0124.1980.00300.x
- Shahbazi, F., Jafarzadeh, A., Sarmadian, F., Neyshaboury, M., Oustan, S., Anaya-Romero, M., Lojo, M., & De la Rosa, D. (2009). Climate change impact on land capability using MicroLEIS DSS. *International Agrophysics*, 23(3), 277–286. Obtenido de http://www.old.international-agrophysics.org/artkyuly/international_agrophysics/IntAgr_2009_23_3_277.pdf
- Thornthwaite, C. W. (1948). An approach toward a rational

notas

- classification of climate. *Geographical Review*, 38(1), 55–94. Obtenido de <http://www.unc.edu/courses/2007fall/geog/801/001/www/ET/Thornthwaite48-GeogrRev.pdf>
- Villers, L., Arizpe, N., Orellana, R., Conde, C., & Hernández, J. (2009). Impactos del cambio climático en la floración y desarrollo del fruto del café en Veracruz, México. *Interciencia*, 34, 322–329. http://www.scielo.org.ve/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0378-18442009000500006
- Walker, N. J., & Schulze, R. E. (2008). Climate change impacts on agro-ecosystem sustainability across three climate regions in the maize belt of South Africa. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 124, 114–124. doi: 10.1016/j.agee.2007.09.001
- Wigley, T. M. L. (2008). *MAGICC/SCENGEN 5.3: User manual (version 2)*. Obtenido de <http://www.cgd.ucar.edu/cas/wigley/magicc/UserMan5.3.v2.pdf>