

Variabilidad climática y productividad agrícola en zonas con errático régimen pluvial*

Climate variability and agricultural productivity in areas with erratic rainfall patterns

Ignacio Sánchez Cohen^{1§}, Marco Antonio Inzunza Ibarra¹, Ernesto Alonso Catalán Valencia¹, José Luis González Barrios¹, Guillermo González Cervantes¹ y Miguel Velásquez Valle¹

¹Centro Nacional de Investigaciones Disciplinarias en Relaciones Agua Suelo Planta Atmósfera, INIFAP. Canal Sacramento km 6.5, Gómez Palacio Durango México. C. P. 35140. Tel. 01 871 7191076. Fax. 01 871 7191134. (inzunza.marco@inifap.gob.mx), (catalan.ernesto@inifap.gob.mx), (gonzalez.barrios@inifap.gob.mx), (gonzalez.guillermo@inifap.gob.mx), (velasquez.agustin@inifap.gob.mx). [§]Autor para correspondencia. sanchez.ignacio@inifap.gob.mx.

Resumen

La alta variabilidad en espacio y tiempo de los regímenes pluviales, hacen que la agricultura en zonas de temporal esté sujeta al riesgo climático. En esta tesitura, la mejor herramienta para sustentar la toma de decisiones lo constituye la modelación hidro-climática en donde se considera lo estocástico de los procesos hidrológicos. En el presente trabajo se hace uso de una serie de algoritmos anidados (AA) para llegar a estimar el rendimiento del cultivo maíz bajo diferentes escenarios climáticos. El algoritmo es calibrado y aplicado a una región de temporal deficiente en el norte de México (Cuencamé, Durango). Se parte de un generador climático (WXPARM) para obtener los parámetros de clima que definen a la región; posteriormente, para cuantificar el impacto del rendimiento del cultivo bajo condiciones de cambio climático, se hace uso de un modelo de reescalado para aplicar los datos de modelos climáticos globales (modelos de circulación general) a nivel parcelario (SDM) y finalmente las matrices que definen las condiciones climáticas mensuales en la región de estudio son utilizadas en un modelo para evaluar el impacto en rendimiento (EPIC) mediante la modelación del balance de humedad en el suelo. Los resultados indican que bajo escenarios de cambio climático, se esperarían incrementos en rendimiento de hasta 0.3 t ha⁻¹ dado el cambio en los patrones climáticos esperados

Abstract

The high variability in space and time of the rainfall patterns, make agriculture in rainfed areas subject to climatic risk. In this situation, the best tool to support decision-making is the hydro-climatic modeling, where the hydrological stochastic processes are considered. In the present study, nested series of algorithms (AA) are used in order to estimate maize crop yield under different climate scenarios. The algorithm is calibrated and applied to a poor rainfed region in northern Mexico (Cuencamé, Durango). It is part of a weather generator (WXPARM) for climate parameters that define the region later to quantify the impact of maize yield under climatic change conditions; using a rescaled model to apply global climatic data models (GCMs) at plot level (SDM) and finally the matrices that define the monthly weather conditions in the region of study are used in a model to assess the impact on yield (EPIC) by modeling the balance of moisture in the soil. The results indicate that under climatic change scenarios, it is expected a yield increases of up to 0.3 t ha⁻¹ as the change in expected weather patterns, expecting a bimodal behavior. According to the weather patterns in the future, it might be considered to adjusting planting dates for the maximum crop requirements coinciding with the presence of rain.

* Recibido: septiembre de 2011
Aceptado: mayo de 2012

en los que se vislumbra un comportamiento bimodal de la lluvia. Acorde al comportamiento del clima en el futuro, sería recomendable el ajuste de fechas de siembra para que los máximos requerimientos del cultivo coincidan con la presencia de lluvias

Palabras clave: incertidumbre climática, modelación, riesgo.

Introducción

En el sector agropecuario de México, 50% de las pérdidas se deben a sequías; 23% a flujos extremos, y 27% a otras causas (Tiscareño, 2006). Este sector es el principal usuario del agua y del suelo: la agricultura de riego utiliza 78% del agua extraída en el país y la ganadería 2%; en cuanto al suelo, se cultivan alrededor de 23 millones de hectáreas, además aproximadamente 112 millones se clasifican como de uso ganadero; casi 70% del territorio nacional tiene un uso agropecuario (CNA, 2006). Lo anterior pone de manifiesto la gran dependencia del bienestar social de la agricultura y ganadería y al impacto de la disponibilidad del agua en el sector (Sánchez-Cohen *et al.*, 2008 a; Sánchez-Cohen *et al.*, 2008 b).

El principal efecto del cambio climático es la incertidumbre climática; es decir, la dificultad en la predicción de variables climáticas debido a la gran aleatoriedad afectada por las condiciones cambiantes del clima (Sellers, 1975; Sánchez-Cohen, 2005). La herramienta más eficaz con que la ciencia moderna cuenta para enfrentar esta situación, es la modelación de procesos en los que se estudia las relaciones causa efecto mediante ecuaciones matemáticas complejas que describen, o tratan de describir, los fenómenos que afectan la climatología en general. Estos algoritmos consideran las perturbaciones atmosféricas en los océanos y en los continentes que derivan en impactos globales causados por el incremento en gases de efecto de invernadero (GEI) que a su vez son los causantes directos del incremento en las temperaturas.

La ocurrencia de precipitación diaria es un ejemplo meteorológico simple de un evento aleatorio binario, por lo que una secuencia de estos eventos constituye una serie de tiempo de esta variable. Un modelo estocástico muy comúnmente usado para el análisis de información de este tipo, son las cadenas de Markov de primer orden para dos estados de la naturaleza. Estas cadenas tienen la propiedad

Key words: climate uncertainty, modeling, risk.

Introduction

In the agricultural sector of Mexico, 50% of losses due to drought, extreme flows 23% and 27% to other causes (Tiscareño, 2006). This sector is the largest user of water and soil: irrigated agriculture uses 78% of the water extracted in the country and livestock 2%, regarding the soil cultivated, 23 million hectares, plus about 112 million classified as livestock use, almost 70% of the country has an agricultural use (CNA, 2006). This demonstrates the high dependence on social welfare of agriculture and livestock and, the impact of water availability in the industry (Sánchez-Cohen *et al.*, 2008 a; Sánchez-Cohen *et al.*, 2008 b). The main effect of climate change is the climatic uncertainty, i.e. the difficulty in predicting climatic variables due to the high randomness affected by changing weather conditions (Sellers, 1975; Sánchez-Cohen, 2005).

The most effective tool with which modern science has to face this situation, the modeling of processes in which we study the cause and effect, using complex mathematical equations that describe, or try to describe the phenomena that affect the weather in general. These algorithms consider atmospheric disturbances in the oceans and continents that lead to global impacts caused by increased greenhouse gases (GHGs) which in turn are the direct cause of the increase in temperatures.

The occurrence of daily precipitation is a simple example of a weather binary random event, so that a sequence of these events is a time series of this variable. A very commonly used stochastic model to analyze such information is the Markov chains of first order for two states of nature. These chains have the property that, the probability of transition governing each observation in the time series depends only on the value of previous data (Haan, 1982; Wilks 1995; Banks 1998).

Hydrological climate modeling allows considering the chances of success of a particular crop under conditions of weather uncertainty (rainfed areas). The purpose of this paper is to present the impact of weather patterns in maize crop productivity using for this purpose, climate-hydrological modeling.

de que la probabilidad de transición que gobierna cada observación en la serie de tiempo, depende sólo del valor del dato anterior (Haan, 1982; Wilks 1995; Banks 1998).

La modelación hidrológica climática permite contabilizar las posibilidades de éxito de un determinado cultivo bajo condiciones de incertidumbre climática (zonas de temporal). El objetivo del presente documento es presentar el impacto de patrones de clima en la productividad del cultivo maíz usando para tal efecto, modelación climática-hidrológica.

La parte medular del algoritmo utilizado para la cuantificación de la variabilidad climática lo constituye el análisis de las series de tiempo de precipitación pluvial en donde se aplican un proceso Markoviano de primer orden y en donde para cada valor en la serie de tiempo de la lluvia, el proceso estocástico se encuentra en el estado 0 (no lluvia, $X_t = 0$) ó 1 (lluvia $X_t = 1$). En cada paso, el estado puede permanecer inmóvil o bien cambiar a otro estado; es decir, si hoy llueve puede suceder que mañana también llueva o que no ocurra lluvia. De esta manera, son posibles cuatro transiciones (Sánchez, 1994; Sánchez *et al.*, 1997; Sánchez-Cohen *et al.*, 2010).

Las probabilidades de transición son condicionales para el estado futuro $t + 1$; es decir, si ocurrirá precipitación mañana, dado el estado al tiempo t , es decir, si ocurrió precipitación hoy. En forma matemática esto es (Sánchez *et al.*, 1995):

$$\begin{aligned}
 p_{00} &= \Pr \{X_{t+1} = 0 \mid X_t = 0\} & 1 \\
 p_{01} &= \Pr \{X_{t+1} = 1 \mid X_t = 0\} & 2 \\
 p_{10} &= \Pr \{X_{t+1} = 0 \mid X_t = 1\} & 3 \\
 p_{11} &= \Pr \{X_{t+1} = 1 \mid X_t = 1\} & 4
 \end{aligned}$$

El procedimiento utilizado para alcanzar el objetivo señalado es, una secuencia de algoritmos anidados (AA) en donde se incluyen: bases de datos locales, modelo de reescalado estadístico, Statistical Downscaling Model (SDM por sus siglas en inglés), bases de datos globales, WXPARM, generador climático, modelo hidrológico erosion productivity impact calculator (EPIC por sus siglas en inglés), Figura 1.

En el módulo I de la Figura 1 se seleccionó a la estación climatológica de Cuencamé Durango en aras de aplicar el algoritmo descrito. Esta región es caracterizada como de alto riesgo climático. En el módulo II, con fines de analizar la manera en que las probabilidades condicionales han variado a través del tiempo bajo condiciones del calentamiento global, se utilizó un modelo de reducción de escala (SDM)

The core of the algorithm used for the quantification of climate variability is the analysis of time series of rainfall in a process where they are applied at first-order Markov and, where for each value in the time series of rainfall, the stochastic process is in state 0 (no rain, $X_t = 0$) or 1 (rain $X_t = 1$). At each step, the state may remain stationary or move into another state, that is, if it rains today may happen also tomorrow. Thus, four transitions are possible (Sánchez, 1994; Sánchez *et al.*, 1997; Sánchez-Cohen *et al.*, 2010).

The transition probabilities are conditional to the future state $t + 1$, i.e. if precipitation will occur tomorrow, given the state at time t , i.e. if precipitation occurred today. In mathematical form this is (Sánchez *et al.*, 1995):

$$\begin{aligned}
 p_{00} &= \Pr \{X_{t+1} = 0 \mid X_t = 0\} & 1 \\
 p_{01} &= \Pr \{X_{t+1} = 1 \mid X_t = 0\} & 2 \\
 p_{10} &= \Pr \{X_{t+1} = 0 \mid X_t = 1\} & 3 \\
 p_{11} &= \Pr \{X_{t+1} = 1 \mid X_t = 1\} & 4
 \end{aligned}$$

The procedure used to achieve the stated objective is a sequence of nested algorithms (AA), including: local databases, statistical rescaling model, Statistical Downscaling Model (SDM), global databases, WXPARM, weather generator, hydrological model, Erosion Productivity Impact Calculator (EPIC) Figure 1.

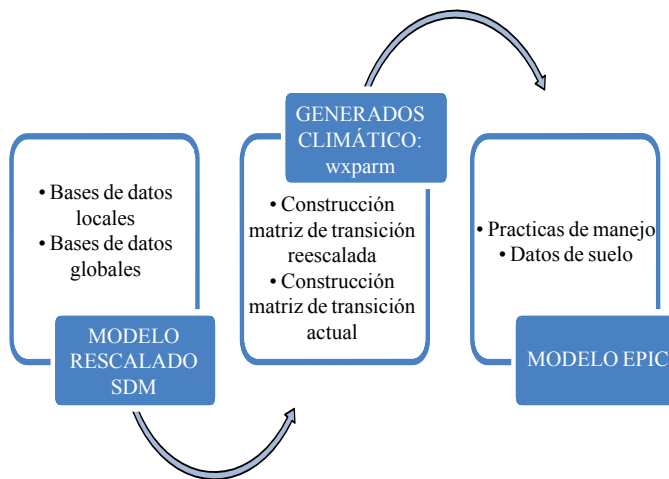


Figura 1. Esquema de los algoritmos anidados para la modelación climática hidrológica (adaptado de Sánchez *et al.*, 2010).

Figure 1. Nested algorithms diagram for hydrological climate modeling (adapted from Sánchez *et al.*, 2010).

In Module I, Figure 1, the selected weather station for Cuencamé, Durango, applying the algorithm described. This region is characterized as a high risk climate. In Module II,

(Wilby *et al.*, 1988) en el que en las técnicas estadísticas de reducción de escala las variables del clima regional o local (predictandos) se obtienen generando un modelo estadístico que las relaciona con las variables de gran escala de los modelos de circulación general (GCMpredictores) (Flato *et al.*, 2000).

Utilizando información de la estación de Cuencamé del uso de este modelo se obtuvo la matriz de ocurrencia de precipitación pluvial para diferentes años: 2020, 2050 y 2080. Con esta información se usó el modelo WXPARM (<http://www.hydrology.uni-kiel.de/~schorsch/epic/html/doku/appendixes/wxparm.html>, Jones y Thornton (1993) para generar 50 años de precipitación y obtener la matriz de transición de lluvia bajo condiciones de cambio climático.

En el módulo III se utilizó el modelo erosion productivity impact calculator (EPIC) (Williams *et al.*, 1983; Izurralde *et al.*, 2003) para obtener el balance de agua en el suelo y el rendimiento del cultivo maíz bajo los dos escenarios ensayados (actual y con cambio climático). Las prácticas de manejo fueron las usuales para la región de estudio.

Cuadro 1. Escenarios y prácticas de manejo ensayadas con el modelo EPIC.

Table 1. Scenarios and management practices tested with EPIC model.

Fecha (mes/día)	Práctica	Escenario	
		Actual	C.C. ¹
5/1	Barbecho	✓	✓
5/15	Fertilización (90 kg ha ⁻¹ de N) a 5 cm profundidad	✓	✓
5/15	Siembra (maíz)	✓	✓
6/15	Cultivada	✓	✓
9/30	Cosecha	✓	✓
10/1	Cosecha de residuos	✓	✓

¹CC= cambio climático.

La Figura 2 presenta la probabilidad condicional del un día con lluvia dado que el día anterior fue seco para la estación de Cuencamé, Durango, bajo los escenarios actual y con cambio climático.

El modelo EPIC simuló de manera precisa el rendimiento del cultivo maíz para el área de influencia de la estación de Cuencamé prediciendo un rendimiento promedio en 10 años de 1.3 t ha⁻¹ comparado con el rendimiento promedio de 1.2

for the purpose of analyzing how the conditional probabilities have changed over time under conditions of global warming, we used a downscaling model (SDM) (Wilby *et al.*, 1988) in which statistical techniques in downscaling regional climate variables or local (predictands) are obtained by generating a statistical model that relates the variables of large-scale general circulation models (GCMpredictores) (Flato *et al.*, 2000).

Using information from the station Cuencamé, the use of this model was obtained with the matrix of occurrence of rainfall for different years: 2020, 2050 and 2080. With this information, WXPARM model was used (~ <http://www.hydrology.uni-kiel.de/schorsch/epic/html/doku/Appendixes/wxparm.html>, Jones and Thornton (1993) to generate 50 years of precipitation and obtain the transition matrix of rain under conditions of climatic change.

In Module III, the Erosion Productivity Impact Calculator (EPIC) model was used (Williams *et al.*, 1983; Izurralde *et al.*, 2003) to obtain the water balance in soil and maize crop yield under both scenarios tested (current and climatic change). Management practices were usual for the study region.

The Figure 2 shows the conditional probability of a day of rain since the previous day was dry season in Cuencamé, Durango, under current scenarios and climate change.

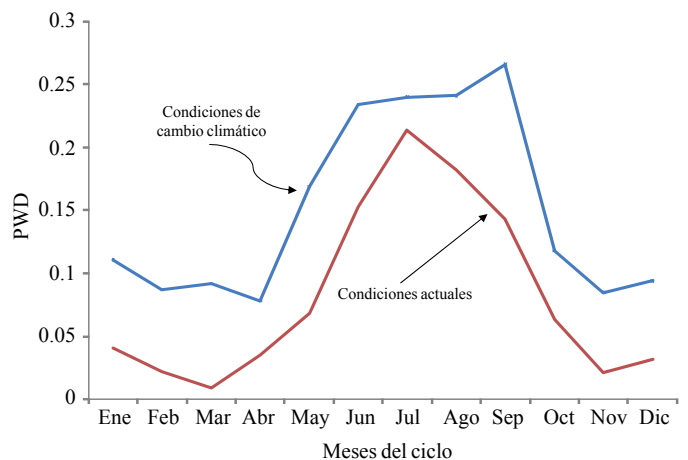


Figura 2. Variación de las probabilidades condicionales de un día con lluvia dado que el día anterior no llovió (PWD) para la estación Cuencamé Durango para condiciones actuales y bajo un escenario de cambio climático para la estación climatológica de Cuencamé, Durango.

Figure 2. Variation of the conditional probabilities of a rainy day because it did not rained the day before (PWD) for the station Cuencamé, Durango current conditions and under a climate change scenario for the weather station Cuencamé, Durango.

t ha⁻¹ reportado por la Secretaría de Ganadería Desarrollo Rural Pesca y Alimentación (SAGARPA- SIAP <http://www.siap.sagarpa.gob.mx>) en la región. En la Figura 3 se aprecia el balance de humedad en el suelo. La sensibilidad del modelo EPIC para predecir rendimiento ha sido documentada por (Wang *et al.*, 2005).

De la Figura 3 se puede observar que existe un déficit de humedad en el suelo prácticamente en todo el desarrollo del cultivo lo que provoca los bajos rendimientos para la localidad. En la Figura 4 se presenta el balance de agua bajo condiciones de cambio climático observándose un incremento en rendimiento promedio de 300 kg por hectárea.

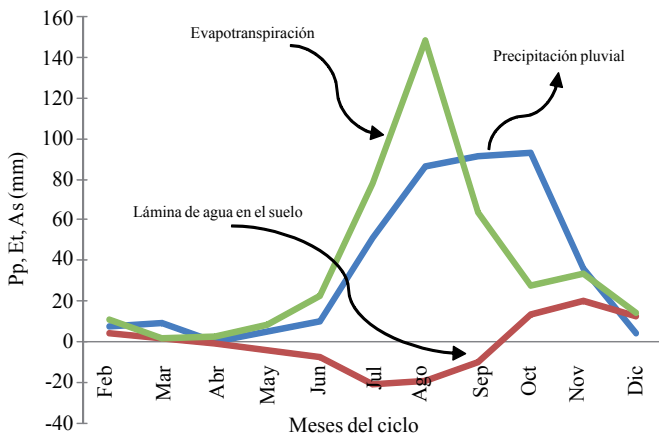


Figura 3. Balance de agua promedio de 10 años simulados con el modelo EPIC para la estación climatológica Cuencamé en el estado de Durango. El rendimiento promedio obtenido de las simulaciones fue de 1.3 t ha⁻¹ comparado con 1.2 t ha⁻¹ acorde a las estadísticas de la SAGARPA regional. Pp es precipitación, Et es la evapotranspiración actual y As es el contenido de humedad en el suelo. Un As negativo significa déficit de humedad en el suelo expresado como lámina de agua.

Figure 3. Water balance average of 10 years simulated with the EPIC model for the weather station Cuencamé, Durango state. The average yield obtained from the simulations was 1.3 t ha⁻¹ compared with 1.2 t ha⁻¹ according to the statistics from the regional SAGARPA. Pp is precipitation, Et evapotranspiration and As is the moisture content in the soil. As negative means deficit of moisture in the soil.

Bajo condiciones de cambio climático al año 2020 las probabilidades condicionales de lluvia dado no lluvia (PW|D), se incrementan indicando con ello el incremento en precipitación como se ha indicado anteriormente. Nótese el impacto de esta situación en el balance de agua en el suelo

EPIC model accurately simulated the maize crop yield for the area of influence of the station Cuencamé, predicting 10-year average yield of 1.3 t ha⁻¹ compared with the average yield of 1.2 t ha⁻¹ reported by the Secretariat Livestock Rural Development Fisheries and Food (SAGARPA-SIAP <http://www.siap.sagarpa.gob.mx>) in the region. The Figure 3 shows the balance of moisture in the soil. The sensitivity of the EPIC model to predict the yield has been documented (Wang *et al.*, 2005).

The Figure 3 shows that there is a shortage of moisture in the ground almost the entire crop's growth leading to low yields for the locality. The Figure 4 shows the water balance under conditions of climate change with an increase in average yield of 300 kg per hectare.

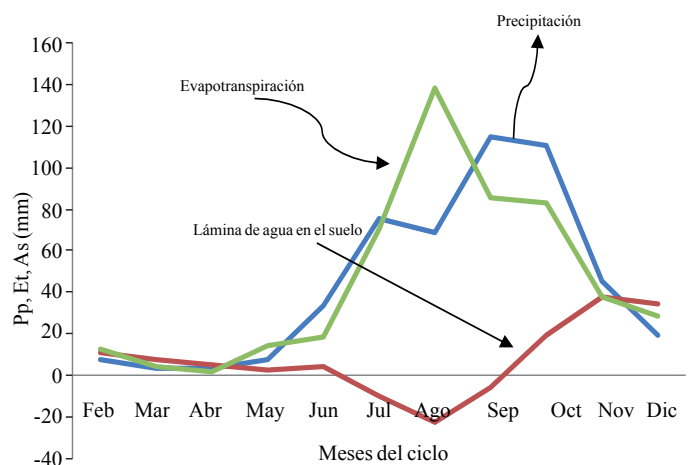


Figura 4: Balance de agua promedio de 10 años simulados con el modelo EPIC para la estación climatológica Cuencamé en el estado de Durango bajo condiciones de cambio climático. El rendimiento promedio obtenido de las simulaciones fue de 1.6 t ha⁻¹. Pp es precipitación, Et es la evapotranspiración actual y As es el contenido de humedad en el suelo.

Figure 4. Water balance average of 10 years simulated with the EPIC model for the weather station Cuencamé, Durango State under conditions of climate change. The average yield obtained from the simulations was 1.6 t ha⁻¹. Pp is precipitation, Et evapotranspiration and, As is the moisture content in the soil.

Under climate change conditions to 2020 the conditional probabilities of rain since no rain (PW|D) increases thereby indicating the increase in precipitation as mentioned. Notice the impact of this situation on the water balance on the floor ground in Figure 4. The impact on yield in the tested scenario is of importance (0.3 t ha⁻¹) since it is a poor rainfed area, indeed, it is

indicado en la Figura 4. El impacto en rendimiento en el escenario ensayado es de importancia (0.3 t ha^{-1}) dado que es una zona de temporal deficiente; más aún, se esperaría un atraso en las siembras para que las mayores posibilidades de lluvia coincidieran con los requerimientos hídricos del cultivo y evitar pérdidas.

Conclusiones

Se ha calibrado un método para cuantificar el impacto de diversos patrones climáticos en el rendimiento del maíz. Este método constituye en sí una serie de algoritmos anidados en el que convergen diversos modelos. Acorde a los resultados, el método es robusto y pudiera ser utilizado para el mapeo de áreas de impacto climático. Según el algoritmo, las siembras del cultivo maíz en la región de temporal deben ser retrasadas para buscar la coincidencia de la máxima precipitación con los requerimientos de agua del cultivo. También pudiera recomendarse una estrategia mixta al incluir obras de captación de agua de lluvia en donde el agua sea capturada para posterior uso o usar el suelo como almacén.

Literatura citada

- Banks, J. 1998. Handbook of simulation. Principles, methodology, advances, applications and practice. Eng. and Manag. Press. 847 pp.
- Comisión Nacional del Agua (CNA). 2006. Estadísticas del agua en México. México, D. F. 198 pp.
- Flato, G. M.; Boer, G. J.; Lee, W. G.; MacFarlane, N. A.; Rmasdem, D.; Reader, M. C. and Weaver, A. J. 2000. The Canadian centre for climate modelling and analysis global coupled model and its climate. *Climatic Dynamics* 16:451-467.
- Haan, C. T. 1982. Statistical methods in hydrology. The Iowa State University Press. 378 pp.
- Izurralde, C. R.; Rosenberg, N. J.; Brown, R. A. and Thompson, A. 2003. Integrated assessment of Hadley Center (HadCM2) climate-change impacts on agricultural productivity and irrigation water supply in the conterminous United States. Part II Regional agricultural production in 2030 and 2095. *Agri. and Forest Meteorol.* 117. The Netherlands. 97-122 pp.

expected a delay in planting for the best chance of rain coincided with the water requirements for cultivation and avoid losses.

Conclusions

A method to quantify the impact of various weather patterns in maize yield has been calibrated. This method is actually a nested series of algorithms that converge in different models. According to the results, the method is robust and could be used for mapping areas of climate impact. According to the algorithm, maize crop in rainfed regions should be delayed to match those of the highest rainfall with the crop's water requirements. It may also be recommend a mixed strategy to include works by capturing rainwater, where the water is captured for later use or used as a warehouse floorg.

End of the English version



- Jones, P. G. and Thorton, P. K. 1993. A rainfall generator for agricultural applications in the tropics. *Agric. Forest. Meteorol.* 63:1-19.
- Sánchez, C. I. 1994. Evaluating strip farming systems: a stochastic approach. Department of Arid Lands Resources Sciences. PhD. Dissertation. The University of Arizona. Tucson, A. Z. 120 pp.
- Sánchez-Cohen, I.; Lopes, V. L.; Slack, D. C. and Hernández, Y. C. 1995. Assesing risk for water harvesting systems in arid environments. *J. Soil Water Cons.* 50(5):446-449.
- Sánchez, C. I.; Lopes, V. L.; Slack, D. C. and Fogel, M. 1997. Water balance model for small scale water harvesting systems. *J. Irrig. Drain. Eng.* 123(2):123-128.
- Sánchez-Cohen, I. 2005. Fundamentos para el manejo integral del agua. Una aproximación de simulación de procesos. INIFAPCENID RASPA. Gómez Palacio, Durango. Libro científico Núm. 2. 272 pp.
- Sánchez-Cohen, I.; Ojeda, B. W.; Chebhouni, E.; Orona, C. I.; Villanueva, D. I.; González, B. J. Ly González, C. G. 2008 a. Variabilidad climática en México: algunos impactos hidrológicos, sociales y económicos. *Ingeniería Hidráulica en México.* Vol. XXIII, núm 4. 5-24 pp.

- Sánchez-Cohen, I.; Díaz, P. G.; Estrada, A. J. y Cueto, W. J. 2008 b. Incertidumbre climática y toma de decisiones. Consideraciones de riesgo y vulnerabilidad social. INIFAP CENID RASPA. Folleto científico Núm. 25. 55 pp.
- Sánchez-Cohen, I.; González, B. J. L.; Díaz, P. G. y Velásquez, V. M. 2010. Cambio climático e incertidumbre: impacto en las variables hidrológicas de las cuencas. *In: manejo comparado de cuencas hidrológicas: Incertidumbre climática, vulnerabilidad ecológica y conflicto social: González, B. J. L y Sánchez, C. I. (Eds.) Gómez Palacio, Durango, México. 23-42 pp.*
- Sellers, W. 1975. Physical climatology. The University of Chicago Press. Chicago, U.S.A. 272 pp.
- Tiscareño, L. M. 2006. Hurricane activity and droughts in México. Paper presented at the North American Drought Monitor International Meeting. National Weather Service. México, D. F.
- Wang, X.; He, X.; Williams, J. R.; Izurralde, R. C. and Atwood, J. D. 2005. Sensitivity and uncertainty analysis of crop yields and soil organic carbon simulated with EPIC. *Transactions of the ASAE. Am. Soc. Agric. Eng. 48(3):1041-1054.*
- Williams, J. R.; Renard, K. G. and Dyke, P. T. 1983. EPIC: a new method for assessing erosion's effect on soil productivity. *J. Soil Water Cons. 38(5):381-383.*
- Wilks, D. S. 1995. Statistical methods in the atmospheric sciences. Department of Soil Crop and Atmospheric Sciences. Academic Press. Ithaca New York. 467 pp.
- Wilby, R. L.; Hassan, H. and Hanaki, K. 1998. Statistical downscaling of hydrometeorological variables using general circulation model output. *J. Hydrol. 205:1-19.* <http://www.siap.sagarpa.gob.mx/> fecha de consulta 5/5/2010.