

## MODELOS MATEMÁTICOS PARA LA ESTIMACIÓN DE VARIABLES HIDROAGRÍCOLAS EN EL DISEÑO DE SISTEMAS DE RIEGO MATHEMATICAL MODELS FOR THE ESTIMATION OF HYDRO AGRICULTURAL VARIABLES IN THE IRRIGATION SYSTEMS DESIGN

**Autores:** Isaí Álvarez Sevilla<sup>1</sup>

Oscar Brown Manrique<sup>2</sup>

Erika Paola del Cid Colindres<sup>3</sup>

**Institución:** <sup>1</sup>Comisión Nacional de Energía Eléctrica (CNEE), Guatemala

<sup>2</sup>Universidad de Ciego de Ávila Máximo Gómez Báez, Cuba

<sup>3</sup>Ecosoluciones Integrales S.A., Guatemala

**Correo electrónico:** [aisaithomas2002@gmail.com](mailto:aisaithomas2002@gmail.com)

[obrown@unica.cu](mailto:obrown@unica.cu)

[epdelcid@gmail.com](mailto:epdelcid@gmail.com)

### RESUMEN

La investigación se desarrolló en la cuenca del río Suchiate en la parte correspondiente a Guatemala, con el objetivo de proponer modelos matemáticos para la estimación de variables hidro agrícolas que contribuyan al uso eficiente del agua en la irrigación. Se generaron seis modelos de regresión del tipo potencial múltiple con dos variables independientes a través de los cuales es posible la estimación de la precipitación efectiva, la evapotranspiración del cultivo y sus necesidades netas. Estos fueron validados mediante el coeficiente de determinación y el Error Porcentual Medio alcanzándose valores adecuados que permiten su utilización segura en el diseño de sistemas de riego.

**Palabras clave:** Evapotranspiración del cultivo, Modelo de regresión, Precipitación efectiva.

### ABSTRACT

The investigation was developed in the basin of the Suchiate River in the part corresponding to Guatemala, with the objective of proposing mathematical models for estimating the hydro agricultural variables that contribute to the efficient use of the water in the irrigation. Six multiple potential regression models were generated with two independent variables through which it is possible the estimate of the effective precipitation, the cultivation evapotranspiration and their net necessities. These were

validated by means of the coefficient of determination and the Average Percentage Error reaching appropriate values that allow their sure use in the irrigation systems design.

**Keywords:** Cultivation evapotranspiration, Effective precipitation, Regression model.

## INTRODUCCION

La agricultura de regadío cubre un área de aproximadamente 280 millones de hectáreas en todo el mundo y produce alrededor del 44 % de la producción agrícola total. La tendencia sugiere que el riego representará el 40 % de la expansión de la superficie agrícola y aproximadamente el 55 % del aumento en la producción de alimentos en el mundo; sin embargo, las únicas dos regiones mundiales con posibilidades de ampliar su área cultivada y de riego de manera sostenible, son África Sub-Sahariana y América Latina (Beekman, 2015); no obstante, dada la dependencia que la agricultura tiene del agua, se requiere encontrar nuevos paradigmas para revitalizar la actividad agrícola en un escenario de menor disponibilidad de agua, de mayor competencia por este líquido y de mayor conciencia social sobre la necesidad de proteger ese recurso (Beekman *et al.*, 2014).

Los modelos son representaciones simplificadas de la realidad, de un sistema complejo, bajo una forma física o matemática, con un gran número de factores que lo componen. Estos se han convertido en la herramienta esencial del planificador de recursos hídricos, sobre todo en el dominio de la estadística, la investigación operacional y el manejo integral del recurso hídrico y del medio ambiente (Llamas, 1993).

Los modelos de regresión lineal múltiple se han utilizado en la predicción espacial de la precipitación en cuencas hidrográficas (Núñez *et al.*, 2014). Por la importancia de esta variable en el diseño y manejo de sistemas de riego agrícola es necesario considerar su relevancia mediante el pronóstico estacional en el período estival; en especial su variación tanto geográficamente como temporalmente (Barría, 2010). A partir de lo anterior se hace evidente que el objetivo del presente trabajo sea orientado hacia la estimación de variables hidro agrícolas mediante modelos de regresión que contribuya al uso eficiente del agua en sistemas de riego en la cuenca del río Suchiate, Guatemala.

## MATERIALES y METODOS

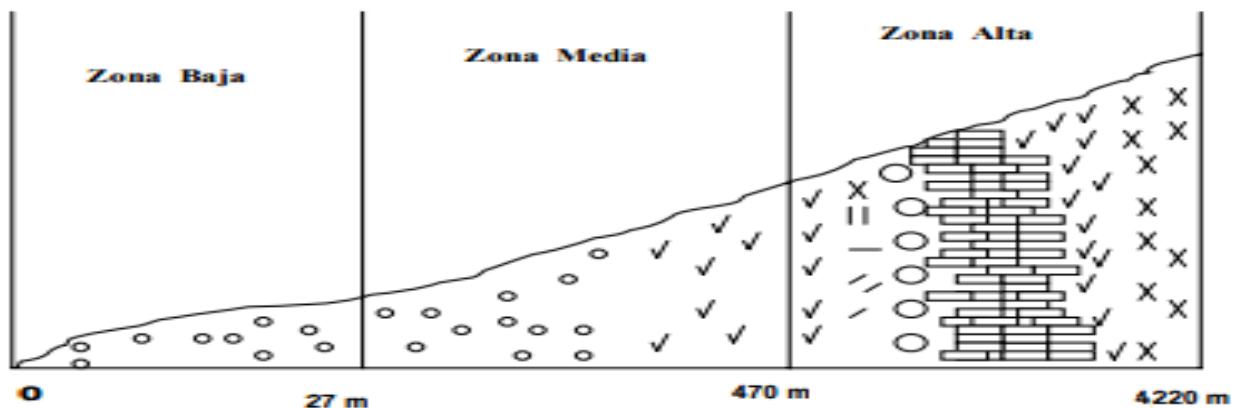
### *Localización del área de estudio*

La investigación se realizó en la cuenca del río Suchiate que es una corriente internacional con una longitud de 81 km, curso rápido y profundidad variable en su paso por el departamento de San Marcos en Guatemala y el estado de Chiapas en México hasta desembocar en el Océano Pacífico (Figura 1). Este sirve de límite entre México y Guatemala con una cuenca transfronteriza que posee una extensión de 1287 km<sup>2</sup> de la cual 1064 km<sup>2</sup> están en territorio guatemalteco y 336 km<sup>2</sup> en territorio mexicano. Sus coordenadas geográficas son las siguientes: latitud 14.509722 y longitud -92.190556.

La cuenca del río Suchiate está constituida por tres regiones con características diferentes; la zona alta se ubica entre los 4220 y 470 msnm; la zona media se extiende entre los 470 y 27 msnm y la zona baja parte de 27 hasta los 0 msnm. La fisiografía del área se clasifica como terrenos ligeramente inclinados a planos como se observa en la Figura 2, que muestra el corte longitudinal de la cuenca del río Suchiate.



Figura 1 Localización de la cuenca del río Suchiate.



**Figura 2** Corte longitudinal de la cuenca del río Suchiate.

La red de drenaje se caracteriza por tener un cauce inestable que tiende a modificarse al escurrir violentamente grandes volúmenes de agua en cierta época del año impactando el suelo arenoso que compone sus márgenes sobre todo en la planicie costera.

En el trabajo se aplicaron métodos para la obtención de información climática y edafológica; generación de la información y el desarrollo de modelos de regresión para las variables hidroagrícolas. El diagnóstico como técnica de adquisición de información se realizó mediante diferentes herramientas con el propósito de encontrar referencias útiles para la investigación. Los métodos utilizados fueron los siguientes:

- *Análisis documental:* se consultaron diversos documentos como mapas de balances hídricos y uso de la tierra (González, 1990, Herrera, 2002, IARNA-URL, 2015); cartas topográficas y edafológicas digitales del Instituto Geográfico Nacional (IGN) a escala 1:50000; atlas climatológico e hidrológico digitales del Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología (INSIVUMEH) a escala 1:1000000; atlas edafológicos y de uso de suelo digitales del Ministerio de Agricultura Ganadería y Alimentación (MAGA) a escala 1:1000000; Información de la base de datos climatológica del MEM; características de los suelos de Guatemala (Duro *et al.*, 2006; Tobías y Duro, 2013); plan de desarrollo municipal del MAGA dentro de la cuenca del río Suchiate; plan maestro de riego y drenaje agrícola de Guatemala (González, 1991; MAGA, 2013); cartera de proyectos existentes en el Instituto Nacional de Energía (INDE).
- *Métodos analíticos:* se utilizaron numerosas ecuaciones matemáticas para el cálculo de diferentes parámetros como precipitación efectiva; lámina de riego;

lámina de riego neta; lámina de riego bruta; frecuencia de riego y número de riegos.

- *Métodos geomáticos*: se utilizaron varias herramientas como el ARCGIS 10.2.1 con sus programas ARCMAP, ARCCATALOG, ARCSCENE, *Interpolate Shape*, además del *Google Earth*, las cuales permitieron la generación de diferentes representaciones como el mapa con isolíneas de precipitación y evapotranspiración potencial e gran utilidad para el diseño agronómico del sistema de riego.

#### *Desarrollos de modelos de regresión*

Los modelos de regresión se generaron en la estimación de las variables necesarias para el aprovechamiento sostenible del agua dentro de la cuenca del río Suchiate de forma rápida, sencilla y confiable. Las variable hidroagrícolas conformaron una serie de 32 años comprendida en el periodo de 1983 a 2015. Estas consistieron en: evapotranspiración del cultivo de referencia, precipitación efectiva, lámina de riego lámina de riego neta, lámina de riego bruta, frecuencia de riego, número de riegos, volumen de agua para el riego. Estas se generaron a través del estudio realizado en la subcuenca “Confluencia Negros-Sin Nombre<sup>1</sup>”. En esta zona el área destinada para la actividad agrícolas ocupa una superficie total de 18,41 km<sup>2</sup> donde los cultivos fundamentales son el café (85 %), el hule (10 %), los pastos cultivados (2 %), el maíz (2,7 %) y el frijol (1,3 %); pero el riego sólo se realiza en estos dos últimos cultivos y se emplea el riego por gravedad con una eficiencia de 40 % (Avendaño, 2007).

En la subcuenca el suelo predominante es el de la serie Suchitepequez (Sx) que ocupa el 67 % del área. Este tipo se correlaciona con un Alisol de la WRB (IUSS, 2007). Sus propiedades hidrofísicas fundamentales se presentan en la Tabla 1 según estudios realizados en Guatemala por González (1991).

**Tabla 1 Propiedades hidrofísicas del suelo.**

| <b>Propiedad</b>                                 | <b>Valor</b> |
|--|--------------|
| Densidad del suelo, $\rho$ (g cm <sup>-3</sup> ) | 1,43         |
| Capacidad de campo, CC (%)                       | 26,7         |
| Punto de marchites permanente, PMP (%)           | 12,6         |
| Nivel de agotamiento permisible, NAP (%)         | 55,0         |

La lluvia efectiva se determinó por medio de la ecuación empírica propuesta por la (FAO, 1993), la evapotranspiración del cultivo de referencia por el método de

Hargreave (Herrera, 2002; Herrera y Brown, 2011) por ser la más representativa de Guatemala, la evapotranspiración del cultivo ( $ET_c$ ) mediante la ecuación de (Allen et al., 1998) y el nivel de descenso tolerable por sugerencia de OMW UPM (2007).

En el caso del coeficiente de cultivo ( $K_c$ ) por la carencia de información sobre este parámetro fue necesaria la integración de los resultados encontrados por Erazo (2005); León y Antón (2007) y González (2012) en estudios realizados por el Servicio Nacional de Estudios Territoriales del Salvador, la Universidad de San Carlos y la Universidad Agrícola Panamericana Zamorano en los departamentos de Jutiapa, Escuintla, Petén, Cobán, Quetzaltenango, Zacapa y Huehuetenango. Estos se exponen en la Tabla 2.

**Tabla 2 Coeficiente  $K_c$  de los cultivos de maíz y frijol.**

| Cultivo | $K_{cini}$ | $K_{cdes}$ | $K_{cmed}$ | $K_{cfin}$ |
|---------|------------|------------|------------|------------|
| Maíz    | 0,50       | 0,80       | 1,15       | 0,70       |
| Frijol  | 0,40       | 0,80       | 1,05       | 0,35       |

Las ecuaciones utilizadas en la determinación de las necesidades hídricas del cultivo fueron las siguientes:

$$P_e = 0,60P - 10 \quad \text{si } P \leq 75 \text{ mm} \quad (1)$$

$$P_e = 0,80P - 25 \quad \text{si } P > 75 \text{ mm} \quad (1)$$

$$L_r = \frac{NAP(CC - PMP)\rho P_r}{10} \quad (2)$$

$$L_n = L_r - P_e \quad (3)$$

$$L_b = \frac{L_r}{\eta} \quad (4)$$

$$F_r = \frac{L_r}{ET} \quad \text{Si } P_e \geq L_r; \quad L_n = 0 \quad (5)$$

$$N_r = \frac{d_m}{F_r} \quad \text{Si } F_r = 0, \quad N_r = 0 \quad (6)$$

$$V_R = \left( \frac{\sum L_b}{1000} \right) N_r \cdot A \quad (7)$$

Donde  $P$  es la precipitación media mensual (mm);  $P_e$  la precipitación efectiva (mm);  $L_r$  la lámina de riego (mm);  $NAP$  el nivel de agotamiento permisible (0,60-0,80);  $CC$  la capacidad de Campo (%bss);  $PMP$  el punto de marchitez permanente (%bss);  $\rho$  la densidad del suelo ( $\text{g cm}^3$ );  $P_r$  la profundidad de raíces (cm);  $L_n$  la lámina de riego

neta (mm);  $L_b$  la lámina de riego bruta (mm);  $\eta$  la eficiencia del sistema (%);  $F_r$  la frecuencia de riego (días);  $N_r$  el número de riegos;  $d_m$  el número de días en el mes;  $V_R$  el volumen de agua para el riego (m<sup>3</sup>);  $A_c$  el área de riego del cultivo (m<sup>2</sup>).

### Validación de los modelos de regresión

A partir de las variables obtenidas se generaron diferentes modelos de regresión con la utilización del programa informático HidroEsta 2 (Villón, 2012). La validación se realizó con datos usados para la estimación y el pronóstico, mediante el Coeficiente de Determinación ( $R^2$ ) que es el indicador más recomendado para medir la fiabilidad del modelo (Vicente, Saz-Sánchez, Cuadrat, 2003; Ninyerola, Pons y Roure, 2005) y el Error Porcentual Medio ampliamente utilizado para medir el desempeño de los modelos (Zúñiga y Jordán, 2005). Este se define como:

$$EPM = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(y_{obs} - y_{sim})^2}{y_{obs}} \cdot 100 \quad (8)$$

Donde EPM es el Error Porcentual Medio (%);  $n$  el número de datos de la serie;  $y_{obs}$  la variable observada;  $y_{sim}$  la variable simulada.

## RESULTADOS Y DISCUSION

### Análisis de las variables hidroagrícolas

En la Tabla 3 se muestran los resultados fundamentales del diseño agronómico para el cultivo del maíz sembrado en los meses de febrero a mayo. En esta etapa la precipitación fue de 760,8 mm, la precipitación efectiva de 515,4 mm y la evapotranspiración del cultivo de 413,9 mm. Estas dos últimas variables representaron el 67,7 % y el 54,4 % respecto al total de lluvia media hiperanual que ocurre en la zona de estudio durante el ciclo del cultivo.

**Tabla 3 Parámetros agronómicos del cultivo de maíz.**

| PARÁMETROS          | Ene   | Feb   | Mar   | Abr   | May   | Jun   | Jul   | Ago   | Sep   | Oct   | Nov   | Dic   | Total  |
|---------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|
| Días del mes, $d_m$ | 31    | 28    | 31    | 30    | 31    | 30    | 31    | 31    | 30    | 31    | 30    | 31    | 365    |
| $P$ (mm)            | 36.4  | 40.9  | 76.8  | 195.3 | 447.8 | 669.9 | 505.0 | 544.9 | 735.8 | 508.6 | 169.7 | 56.9  | 3987.9 |
| $ET_o$ (mm)         | 111.5 | 110.2 | 138.1 | 135.3 | 132.4 | 120.3 | 130.0 | 128.2 | 114.5 | 111.8 | 102.4 | 102.0 | 1436.7 |
| $K_c$ (adim)        | 0.00  | 0.50  | 0.80  | 1.15  | 0.70  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  |        |
| $P_e$ (mm)          | 0.0   | 14.5  | 36.4  | 131.2 | 333.2 | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 515.4  |
| $ET_c$ (mm)         | 0.0   | 55.1  | 110.5 | 155.6 | 92.7  | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 413.9  |
| $ET_c$ (mm/d)       | 0.0   | 2.0   | 3.6   | 5.2   | 3.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 13.7   |
| $N_n$ (mm)          | 0.0   | 40.6  | 74.1  | 24.3  | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 139.0  |
| $L_n$ (mm)          | 57.8  | 43.3  | 21.4  | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 122.5  |
| $L_b$ (mm)          | 144.5 | 108.2 | 53.4  | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 306.1  |
| $F_r$ (días)        | 0     | 29    | 16    | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     |        |
| $N_r$ (mm)          | 0     | 1     | 2     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 3      |

Las necesidades netas del cultivo son de 139 mm y se presentan en los tres primeros meses del ciclo vegetativo; debido a que la evapotranspiración es mayor que la precipitación efectiva; sin embargo, a partir de mayo que es el cuarto mes del ciclo del cultivo, las precipitaciones se incrementan notablemente desde 447,8 mm hasta 735,8 mm en el mes de septiembre y 508,6 mm en el mes de octubre.

Estos valores pluviométricos tan elevados impiden el desarrollo de riego durante el segundo ciclo del cultivo, que en Guatemala es de agosto a noviembre. En general se observa que el número de riego para este cultivo durante el ciclo febrero-mayo es tres y se produce cuando el valor de las precipitaciones es inferior a 76,8 mm.

Este resultado confirma lo expuesto por Pereira *et al.* (2010); Kremer y Seguel (2009) y Puiatti, Rivetti y Schmalz, (2014) en relación a que el riego solo debe suministrarse para compensar la pérdida de agua por evapotranspiración cuando la lluvia es insuficiente y las láminas a aplicar y sus frecuencias deben ser a partir del cálculo del balance hídrico.

En este mismo sentido Frenken y Gille (2012) afirman que las precipitaciones y en concreto su fracción efectiva, aportan parte del agua que los cultivos necesitan para satisfacer sus necesidades de transpiración; por lo que en climas húmedos este mecanismo es suficiente para garantizar un crecimiento satisfactorio de los cultivos.

En la Tabla 4 se presentan los resultados del diseño agronómico para el cultivo del frijol para las mismas condiciones edafoclimáticas. Se observa que las necesidades netas totales del cultivo son de 114,4 mm y corresponden a los meses de febrero, marzo y abril; por lo que fue necesario aplicar un total de tres riegos para cubrir el déficit de evapotranspiración del cultivo. En este cultivo también los elevados valores de precipitaciones interrumpen la actividad de riego durante el segundo ciclo del cultivo.

**Tabla 4 Parámetros agronómicos del cultivo de frijol.**

| PARÁMETROS             | Ene   | Feb   | Mar   | Abr   | May   | Jun   | Jul   | Ago   | Sep   | Oct   | Nov   | Dic   | Total  |
|------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|
| Días del mes, $d_m$    | 31    | 28    | 31    | 30    | 31    | 30    | 31    | 31    | 30    | 31    | 30    | 31    | 365    |
| P (mm)                 | 36.4  | 40.9  | 76.8  | 195.3 | 447.8 | 669.9 | 505.0 | 544.9 | 735.8 | 508.6 | 169.7 | 56.9  | 3987.9 |
| ET <sub>o</sub> (mm)   | 111.5 | 110.2 | 138.1 | 135.3 | 132.4 | 120.3 | 130.0 | 128.2 | 114.5 | 111.8 | 102.4 | 102.0 | 1436.7 |
| K <sub>c</sub> (adim)  | 0.00  | 0.40  | 0.80  | 1.05  | 0.35  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  |        |
| P <sub>e</sub> (mm)    | 0.0   | 14.5  | 36.4  | 131.2 | 333.2 | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 515.4  |
| ET <sub>c</sub> (mm)   | 0.0   | 44.1  | 110.5 | 142.0 | 46.3  | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 343.0  |
| ET <sub>c</sub> (mm/d) | 0.0   | 1.6   | 3.6   | 4.7   | 1.5   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 11.4   |
| N <sub>n</sub> (mm)    | 0.0   | 29.6  | 74.1  | 10.8  | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 114.4  |
| L <sub>n</sub> (mm)    | 57.8  | 43.3  | 21.4  | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 122.5  |
| L <sub>b</sub> (mm)    | 144.5 | 108.2 | 53.4  | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 306.1  |
| F <sub>r</sub> (días)  | 0     | 37    | 16    | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     |        |
| N <sub>r</sub> (mm)    | 0     | 1     | 2     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 3      |



### *Análisis de los modelos de regresión de las variables hidroagrícolas*

Los resultados de la investigación permitieron generar seis modelos de regresión del tipo potencial múltiple con dos variables independientes a través de los cuales es posible la estimación de la precipitación efectiva, la evapotranspiración del cultivo y sus necesidades netas.

Estas ecuaciones responden al comportamiento de las variables antes mencionadas durante el primer ciclo de febrero a mayo en que se siembran los cultivos de maíz y frijol en Guatemala; pues como ya se explicó anteriormente los elevados valores de lluvia a partir del mes de mayo imposibilitan la actividad de riego durante el segundo ciclo para estos cultivos en los meses comprendido de agosto a noviembre. Las ecuaciones encontradas para el cultivo del maíz son las siguientes:

$$P_e = 0,070P^{1,268}ET_o^{0,144} \quad (9)$$

$$ET_c = 163,88P^{0,037}K_c^{1,345} \quad (10)$$

$$N_n = 0,009P^{-4,671}ET_c^{6,350} \quad (11)$$

Las ecuaciones obtenidas para el cultivo del frijol se escriben como:

$$P_e = 0,005P^{0,672}ET_o^{1,273} \quad (12)$$

$$ET_c = 106,55P^{-0,063}K_c^{1,122} \quad (13)$$

$$N_n = 9,069P^{-3,359}ET_c^{3,582} \quad (14)$$

Donde  $P$  es la precipitación media mensual (mm);  $P_e$  la precipitación efectiva (mm);  $K_c$  coeficiente del cultivo;  $ET_o$  la evapotranspiración de referencia media mensual (mm);  $ET_c$  la evapotranspiración media mensual del cultivo (mm);  $N_n$  las necesidades netas del cultivo (mm).

En la Tabla 5 se comprueba que las variables precipitación efectiva, evapotranspiración media mensual del cultivo y necesidades netas del cultivo pueden estimarse mediante el modelo potencial múltiple con dos variables independientes. El coeficiente de determinación fue perfecto de acuerdo con Mondragón (2014) al lograr valores superiores a 0,99 en todos los casos.

**Tabla 5 Criterios para la validación de los modelos hidroagrícolas.**

| Parámetros         | Tipo de modelo          | $R^2$  | EPM |
|--------------------|-------------------------|--------|-----|
| $P_e = f(P, ET_o)$ | Potencial múltiple (2V) | 0,9967 | 5,2 |
| $ET_c = f(P, K_c)$ | Potencial múltiple (2V) | 0,9909 | 7,7 |
| $N_n = f(P, ET_c)$ | Potencial múltiple (2V) | 0,9871 | 8,4 |

|                    |                         |        |     |
|--------------------|-------------------------|--------|-----|
| $P_e = f(P, ET_o)$ | Potencial múltiple (2V) | 0,9986 | 3,8 |
| $ET_c = f(P, K_c)$ | Potencial múltiple (2V) | 0,9926 | 6,3 |
| $N_n = f(P, ET_c)$ | Potencial múltiple (2V) | 0,9988 | 3,1 |

Quevedo y Sánchez (2013) usaron el coeficiente de determinación ( $R^2$ ) como indicador de la bondad del ajuste de los modelos de regresión encontrados para estimar variables climáticas como evapotranspiración referencial, temperatura y radiación solar en estudios auspiciados por el SENAMHI y el Ministerio de Agricultura y Riego del Perú.

Vázquez y Solano (2013) encontraron un modelo polinomial de segundo orden para estimar la precipitación y la evapotranspiración de referencia para periodos decadales, mensuales y anuales para toda la república de Cuba con coeficientes de determinación que oscilaron entre 0,72 y 0,97.

Quevedo y Sánchez (2013) encontraron modelos de Regresión lineal simple para la estimación de la evapotranspiración referencial con coeficientes de determinación comprendidos entre 0,70 a 0,89 en estudios realizados en un área que corresponde a todo el territorio del Perú, el cual comprende áreas con fisonomías distintas en costa, sierra y selva.

En general los resultados demuestran que los coeficientes de determinación oscilaron en el rango de 0,9871 a 0,9988; lo que se corresponde con coeficientes de correlación de Pearson entre 0,85 y 0,99 clasificándose como correlación positiva perfecta. Esto significa según Gordon y Camargo (2015) que el valor del  $R^2$  como proporción de varianza compartida entre las variables dependientes e independientes involucradas en los modelos encontrados, explican del 98,71 % al 99,8% de los resultados debido a la relación entre estas variables.

El Error Porcentual Medio empleado también como criterio de validación de los modelos de regresión estuvo comprendido entre el 3,1 % y el 8,4 % por lo que se considera aceptable. Potenciano y Garzón (2005) afirman que los modelos de regresión al ser validados constituyen herramientas útiles que puede servir de complemento a otros métodos ya existentes, teniendo en cuenta la integración de factores geomorfológicos, litológicos y climáticos.

## CONCLUSIONES

Los modelos matemáticos de regresión de tipo potencial múltiple con dos variables independientes permitieron la estimación de variables hidroagrícolas como la

precipitación efectiva, la evapotranspiración del cultivo y las necesidades netas de agua. En el proceso de verificación de su validez se demostró que el coeficiente de determinación estuvo entre 0,9871 y 0,9988 con una calificación de perfecta; mientras que el Error Porcentual Medio fue satisfactorio con valores comprendidos entre el 3,1 al 8,4 %.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALLEN, R. G. ...[et al.] (1998). Crop Evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements. Paper 56. Rome: Ed. FAO. Irrigation and Drainage, 301 p.
- AVENDAÑO, C. (2007). Conservación de los recursos naturales con un enfoque comunitario en Chelemhá, Alta Verapaz, Guatemala. Proyecto FODECYT No.11-2003. Guatemala: Ed. Universidad de San Carlos de Guatemala, 43 p.
- BARRÍA, P. A. (2010). Pronóstico de caudales medios mensuales en las cuencas de los ríos Baker y Pascua. Santiago de Chile. 167 h. Tesis de Ingeniería Civil, Universidad de Chile.
- BEEKMAN, G. ...[et al.] (2014). Agua, alimento para la tierra. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA). Costa Rica: Ed. IICA, 106 p.
- BEEKMAN, G. (2015). Agua y seguridad alimentaria. Proceso Regional de las Américas Sub-región América del Sur. VII Foro Mundial del Agua. Corea: Ed. CAF, 29 p.
- DURO, J. M. ...[et al.] (2006). Mapa de taxonomía de suelos y capacidad de uso de la tierra a escala 1:50,000 de la República de Guatemala (Fase I y II). Guatemala: Ed. Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación (MAGA), 50 p.
- ERAZO, A. M. (2005). Balance hídrico integrado y dinámico en el Salvador. Servicio Nacional de Estudios Territoriales (SNET), Procedimientos y Avances. El Salvador. [en línea]. Noviembre 2004. Disponible en: <http://www.snet.gob.sv/>. Visitado el 01 de febrero de 2017.
- FAO. (1993). CROPWAT. Programa de ordenador para planificar y manejar el riego. Estudio Riego y Drenaje, No.46. Roma: Ed. FAO. Irrigation and Drainage, 301p.
- FRENKEN, K. y GILLE, V. (2012). Irrigation water requirement and water withdrawal by country. AQUASTAT Reports. Roma: Ed. FAO, 263 p.

- GONZÁLEZ, O. A. (1990). Caracterización hidroclimática de Guatemala con fines de riego. Plan maestro de riego y drenaje, Documento No.1. Proyecto PNUD/OSP/GUA/88/003/. Componente de riego. Guatemala: Ed. Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, 60 p.
- GONZÁLEZ, O. A. (1991). Desarrollo del riego y drenaje agrícola en Guatemala. Plan maestro de riego y drenaje, Documento No.3. Proyecto PNUD/OSP/GUA/88/003/. Componente de riego. Guatemala: Ed. Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, 67 p.
- GONZÁLEZ, A. E. (2012). Diseño de un sistema de riego por goteo para maíz y soya en Zamorano, Honduras. Zamorano. 96 h, Tesis de Ingeniero Agrónomo, Universidad Agrícola Panamericana Zamorano.
- GORDON, R. y CAMARGO, I. (2015). Selección de estadísticos para la estimación de la precisión experimental en ensayos de maíz. Costa Rica. *Revista Agronomía Mesoamericana*, Vol.26, No.1, p.55-63.
- HERRERA, I. R. (2002). Hidrogeología Práctica. 1<sup>ra</sup> ed. Guatemala: Ed. Red Centroamericana de Manejo de Recursos Hídricos, 345 p.
- HERRERA, I. R. y BROWN, O. (2011). Propuesta de una metodología para la estimación de áreas de recarga hídrica en Guatemala. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, Vol.20, No.4, p.48-52.
- IARNA-URL. (2015). Balance hidrológico de las subcuencas de la República de Guatemala Bases fundamentales para la gestión del agua con visión a largo plazo. Serie textos para la educación y el cuidado de la vida 6. Instituto de Agricultura, Recursos Naturales. Guatemala: Ed. Universidad Rafael Landívar, 65 p.
- IUSS. (2007). Base Referencial Mundial del Recurso Suelo. Informes sobre Recursos Mundiales de Suelos. Primera actualización. No.103. Roma: Ed. Grupo de Trabajo WRB, 134 p.
- KREMER, C. y SEGUÉL, O. (2009). Riego en hortalizas. Boletín Informativo No.6. Santiago de Chile: Ed. Universidad de Chile, 53 p.
- LEÓN, W. E. de y ANTÓN, A. (2007). Eficiencia del uso del agua en la producción agrícola en Guatemala. Instituto de Ciencia y Tecnología Agrícolas (ICTA),

- Guatemala. [en línea]. Junio 2007. Disponible en: <http://webarchiv.ethz.ch/lcm2007/440.pdf>. Visitado el 01 de febrero de 2017.
- LLAMAS, J. (1993). Hidrología general, principio y aplicaciones. País Vasco: Ed. Universidad del País Vasco, 635 p.
- MINISTERIO DE AGRICULTURA GANADERÍA Y ALIMENTACIÓN (MAGA). (2013). Política de Promoción del Riego 2013-2023. Directorio Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación Administración 2012-2016- Contrato AID-520-TO-11-00001. Guatemala: Ed. USAID.
- MONDRAGÓN, M. A. (2014). Uso de la correlación de Spearman en un estudio de intervención en fisioterapia. *Corporación Universitaria Iberoamericana. Movimiento Científico*. Vol.8, No.1, p.98-104.
- NINYEROLA, M., PONS, X. y ROURE, J. M. (2005). A methodological approach of climatological modelling of air temperature and precipitation through GIS techniques. *International Journal of Climatology*, No. 20, p.1823-1884.
- NÚÑEZ, D. ...[et al.] (2014). Uso de modelos de regresión para interpolar espacialmente la precipitación media mensual en la cuenca del río Conchos. México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, Vol.5, No. 2, p. 201-213.
- OMW UPM. (2007). Climatología aplicada a la ingeniería y el medio ambiente”, Tema 9, necesidades netas, España. [en línea]. Enero 2007. Disponible en [http://www.bom.gov.au/hydro/wr/wmo/guide\\_to\\_hydrological](http://www.bom.gov.au/hydro/wr/wmo/guide_to_hydrological). Visitado el 26 de enero de 2017.
- PEREIRA, L. S. ...[et al.] (2010). El riego y sus tecnologías. Albacete, España: Ed. Centro Regional de Estudios del Agua (CREA), 295 p.
- POTENCIANO, A. y GARZÓN, G. (2005). Parámetros geomorfológicos y regresión múltiple en el comportamiento hidrológico de caudales en las cuencas altas de los ríos Tajo y Guadiana. Madrid, España. *Geogaceta*, No. 38, p.259-262.
- PUIATTI, J. M., RIVETTI, A. R. y SCHMALZ, J. H. (2014). Riego complementario en maíz (*zea mays l.*) en la región de río cuarto empleando el pronóstico climático extendido de 72 horas. Argentina: Ed. Universidad Nacional de Río, 8 p.
- QUEVEDO, K. y SÁNCHEZ, K. (2013). Atlas de evapotranspiración referencia. Lima, Perú: Ed. MINAM/SENAMHI/MINAGRI, 110 p.

- TOBIÁS, H., DURO, J. M. (2013). Estudios del recurso suelo en Guatemala. USAC-MAGA. [en línea]. Mayo 2012. Disponible en: [http://www.fao.org/fileadmin/user\\_upload/GSP/docs/Central\\_America\\_WS/GUAT\\_EMALALA.pdf](http://www.fao.org/fileadmin/user_upload/GSP/docs/Central_America_WS/GUAT_EMALALA.pdf). Visitado el 13 de febrero de 2017.
- VÁZQUEZ, R. J. y SOLANO, O. J. (2013). Modelación espacial de la lluvia y la evapotranspiración teniendo en cuenta parámetros geográficos. *Revista Ciencias de la Tierra y el Espacio*, Vol.14., No.1, p.80-90.
- VICENTE, S. M., SAZ-SÁNCHEZ, M. A. y CUADRAT, J. M. (2003). Comparative analysis of interpolation methods in the middle Ebro Valley (Spain): application to annual precipitation and temperature. United Kingdom. *Climate Research*, No. 24, p.161-180.
- VILLÓN; M. G. (2012). HidroEsta 2. Manual del usuario. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Cartago, Costa Rica: Ed. CDMB, 384 p.
- ZÚÑIGA, A. y JORDÁN, C. (2005). Pronóstico de caudales medios mensuales empleando Sistemas Neurofuzzy. Mantua, Ecuador. *Revista Tecnológica ESPOL*, Vol.8, No.1, p.17-23.