

# GENERACION, CALIBRACION Y EVALUACION DE MODELOS EMPIRICOS PARA ESTIMAR LA EVAPOTRANSPIRACION POTENCIAL EN LA COMARCA LAGUNERA

L. Enríquez-Espitia<sup>1</sup>, E. Santamaría-César<sup>1</sup> y  
R. Castro-Franco<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Unidad Regional Universitaria de Zonas Áridas. Universidad Autónoma Chapingo.  
A.P. 8 Bermejillo, Durango. México. 35230.

**RESUMEN.** Cuando se correlacionan las variables agroclimáticas con datos de evapotranspiración medidas *in situ*, esto ayuda a desarrollar modelos matemáticos para medir las necesidades de agua por las plantas. Con el lisímetro de pesada del CENID - RASPA en Gómez Palacio, Dgo. se registraron datos de evapotranspiración (ET) para el cultivo de alfalfa en los años de 1993, 1994 y mitad de 1995, los cuales sirvieron de apoyo para la generación de dos modelos empíricos regionales obtenidos mediante un análisis de regresión polinomial. Resultando dos modelos alimentados con diferentes variables climáticas. Además con los datos de 1993 se evaluaron los modelos empíricos de evaporación, Rodríguez Zavaleta, Penman (1949), Jensen-Haise, Hargreaves Samani, así como los modelos I y II generados Regionalmente. Los modelos fueron evaluados utilizando un criterio de regresión lineal simple. Así mismo, se optó por calibrar el modelo de H. Samani con el objeto de mejorar su estimación de la ET, para esto se usó un método iterativo no lineal propuesto por Gauss.

Se concluyó que los modelos con mayor poder de predicción fueron el H. Samani calibrado, el modelo propuesto por Penman y el modelo II generado regionalmente. De estos modelos, el de penman tiene la desventaja de que requiere demasiada información para su alimentación. Los otros dos modelos ocupan poca información, por lo que se recomienda su utilización en la Comarca Lagunera.

**Palabras clave:** Lisímetro, Variables Climáticas.

**SUMMARY.** Agroclimatic variable conelated with all the evapotranspiration data measured *in situ*, is usefull to develop mathematical models that are best to measure the plant's needs of water. The lisimeter of the CENID-RASPA in Gomez Palacio, Dgo. evaporation data for alfalfa crop were registered in the years 1993, 1994 and half of 1995, which served us as support for the generation of two regional empiric models obtained by means of analysis of regression polynomial. Being two models fed with different climatic variables. Also, with the data of 1993, the empiric models of evaporation Rodriguez Zavaleta, Penman, Jensen-Haise, Hargreaves Samanin and models I and II The models were evaluated using the approach of simple lineal regression. Likewise, we decided to the model H. Samani in order to improve the estimate of the ET, for this we used a non-lineal model proposed by Gauss.

From this study we conclude that the models with more prediction power were H Samani's, the model proposed by Penman and the model II generated regionally. Of these models, Penman's has the disadvantage that it requires too much information. The other two models require little information, therefore their use is recommended in the Comarca Lagunera.

**Key words:** Lisimeter, Agroclimatic Variable.

## INTRODUCCION

El conocimiento del uso consuntivo o ET de los cultivos es de gran utilidad en el diseño y planeación de los sistemas de riego, así como para mejorar la eficiencia en el uso del agua por las plantas mediante calendarios de riego que se ajusten a las etapas críticas de necesidades hídricas.

La técnica de modelación surge como paso

preliminar para la calendarización del riego. La investigación debe evaluar la influencia e interacción de los factores climáticos para desarrollar o calibrar modelos matemáticos que permitan predecir los requerimientos de agua en los cultivos con aceptable confiabilidad.

Existen métodos directos para medir la ET en campo (lisímetros, gravimétrico, etc.) cuyos resultados pueden correlacionarse con los factores climáticos para la generación de un modelo. Así mismo en la calibración

de éstos, la experiencia ha mostrado que cuando se incorporan coeficientes regionales la predicción de los modelos mejora considerablemente.

Los lisímetros son generalmente la herramienta que ayuda a evaluar la confiabilidad de los procedimientos empíricos, dichos lisímetros son recipientes grandes, llenos de suelo, ubicados en el campo para representar sus características naturales, en las cuales las condiciones agua-suelo-planta pueden ser reguladas y controladas (Aboukhaled, 1986; Hillel, *et al.* 1969).

Existen varios tipos de lisímetros que son los no pesantes o volumétricos y los pesantes. En estos últimos se utilizan varios tipos de balanzas mecánicas para detectar los cambios de peso debidos a la ET, precipitación o irrigación. La sensibilidad de estos lisímetros puede alcanzar valores de 0.03 mm de agua por diferencia de peso.

**Evapotranspiración.** La ET usualmente expresada en mm se considera como la cantidad de agua perdida por el complejo planta-suelo en las condiciones meteorológicas, edáficas y biológicas existentes.

La Evapotranspiración potencial (Etp) se refiere al agua que evapotranspira un cultivo verde, bajo, de altura uniforme y que sombrea por completo el suelo al que en ningún momento le falta agua. (Gavande, 1982, citado por García, 1985).

La ET se ve afectada por la altura y rugosidad del cultivo, la resistencia estomática, por la calidad del agua, la fertilidad del suelo y por las variables climáticas.

Estimación de la evapotranspiración potencial (ETp). Existen varios modelos para estimar la Etp de los cultivos, algunos tan simples como el modelo de evaporación y otros tan sofisticados como la ecuación de Penman.

A continuación se describen algunos modelos que se han propuesto por parte de investigadores con la finalidad de estimar la Etp.

Modelo original de Blaney–Criddle (García, 1985)

$$ET = Kc (fr)^{1.38}$$

$$fr = (TR)(P) / 100$$

$$TR = (t. \max)^2 - (t. \min)^2$$

$$Etp = \frac{(Po / P) (\Delta / r) 0.75 * Ra (0.29 + 0.42n/N) - \sigma Tk^4 (0.56 - 0.079 \sqrt{e_d}) (0.1 + 0.9 n/N) + 0.26 (e_a - e_d) (1 + 0.45U)}{(Po / P) (\Delta / r) + 100}$$

Donde :

ET = Evapotranspiración estimada en mm / periodo

fr = Factor de temperatura que refleja el efecto de la fuerza evaporante por periodo de tiempo

P = Porcentaje de horas luz

TR = Diferencia de cuadrados entre la temperatura máxima y la temperatura mínima.

### Ecuación de Penman (García, 1985)

Penman en 1949 combinó la ecuación de balance de energía con una ecuación aerodinámica derivada experimentalmente y el modelo resultante originalmente proporcionaba una estimación de la evaporación libre de agua. Estos valores fueron multiplicados por una constante para aproximar la estimación de la ET potencial para una pradera que se irrigaba completamente y sombreaba el terreno totalmente.

Donde:

Etp= Estimación de evapotranspiración potencial en un período determinado (mm)

Po = Presión atmosférica media expresada en mb al nivel del mar

P = Presión atmosférica media expresada en mb en función de la altitud de la estación

$\Delta$  = Gradiente de la presión de vapor saturante con respecto a la temperatura, expresada en mb por grado centígrado

r = Coeficiente psicrométrico, para el Psicrómetro con ventilación forzada = 0.66

0.75 = Factor de reducción de la radiación total de honda corta, que corresponde a un albedo de 0.25

Ra = Radiación de onda corta recibida en el límite de la atmósfera expresada en mm de agua aprovechable (1 mm = 59 calorías) o tabla de valores de Argot

n = Duración de la insolación del período que se estudia expresada en horas y décimas de hora

N = Duración de insolación astronómica

$\sigma Tk^4$  = Radiación del cuerpo negro expresada en mm de agua evaporable para la temperatura prevaleciente del aire

e<sub>a</sub> = Presión del vapor saturante, expresada en mb

e<sub>d</sub> = Presión de vapor durante el período que se estudia o actual, expresada en mb

U = Velocidad media del viento a una altura de 2 metros durante el período que se estudia.

**1985) Ecuación de Hargreaves - Samani (García,**

$$E_{tp} = 0.0023 Ra (T + 17.89)TD^{0.5}$$

Donde:

E<sub>tp</sub> = Transpiración potencial en mm/día  
 Ra = Radiación extraterrestre expresada en mm/día de evaporación equivalente  
 T = Temperatura media en °C  
 TD = (T<sub>max</sub> - T<sub>min</sub>) en °C

**1986) Método modificado por Jensen - Haise (INIFAP,**

$$E_{tp} = Ct(T - T_x)R_s$$

Donde:

E<sub>tp</sub> = Evapotranspiración potencial (mm/día)  
 Ct = Es un coeficiente de temperatura del aire constante para un área dada, determinado a partir de las temperaturas máxima y mínima para el mes más cálido

T = Temperatura media diaria (°C)

T<sub>x</sub> = Constante que depende del área en estudio y que no es más que la ordenada al origen sobre el eje de las temperaturas

R<sub>s</sub> = Radiación solar diaria expresada como lámina equivalente de evaporación (mm)

$$C_T = \frac{1}{C_1 + C_2 CH} \quad CH = \frac{37.5 \text{ mmHg}}{e_2 - e_1} = \frac{50 \text{ mb}}{e_2 - e_1}$$

Donde:

CH = Índice de humedad

e<sub>2</sub> y e<sub>1</sub> = Son las presiones del vapor a saturación a las temperaturas promedio máximas y mínimas respectivamente del mes más caliente del año en la región considerada.

**Ecuación de evaporación**

García Benavides considera que a partir de la evaporación se puede estimar la evapotranspiración potencial como sigue:

$$E_{tp} = 0.8 E_v$$

**MATERIALES Y METODOS**

El trabajo se desarrolló en el CENID-RASPA del INIFAP en Gómez Palacio, Dgo. México 103°LO y 25°LN altitud 1140 msnm. En donde se generaron datos de evapotranspiración en el lisímetro de pesada y se tomaron los datos agroclimáticos en la estación meteorológica.

**Generación del modelo regional**

Con la base de datos de los años 1993, 1994 y parte de 1995, de las variables climáticas diarias: temperatura media, rango de temperaturas, evaporación, horas luz, fotoperiodo y la relación Horas luz / fotoperiodo (n/N), y los datos lisimétricos de los mismos años, se sometieron a un análisis de regresión polinomial en el que se tomaron las variables climáticas como independientes y los datos lisimétricos como dependientes. Utilizando el paquete estadístico SAS se eliminaron todas aquellas variables climáticas o elementos del modelo que no fueron significativos al 5%, siguiendo siempre el criterio óptimo de ajuste de modelos polinomiales.

**Evaluación de los modelos empíricos**

Los modelos probados son el de Evaporación, Rodríguez Zavaleta, Penman (1948), Jensen-Haise, Hargreaves-Samani y los modelos y II regionales.

Procedimiento de análisis para los modelos probados: Se obtuvieron los valores estimados para el año 1993 de cada modelo, alimentando estos con las diferentes variables que cada uno requiere. Se utilizó el criterio de regresión lineal simple, donde se obtuvieron para cada modelo los coeficientes de regresión producto de la regresión entre los valores estimados con cada modelo (variable dependiente) y los valores medidos con el lisímetro (variable independiente), para estos coeficientes se construyeron los intervalos de confianza al 95%.

El criterio para decidir el o los modelos más eficientes en la predicción de la evapotranspiración fue el siguiente; si un intervalo de confianza (b) no contiene a la unidad, entonces, se sobreestima o subestima la evapotranspiración dependiendo de si el intervalo de confianza cubre valores superiores o inferiores a la unidad. Además, atendiendo a la anchura de este intervalo de confianza que se define como la diferencia entre el límite superior y el límite inferior, se eligieron como mejores modelos empíricos aquellos que incluyendo a la unidad tuvieran la menor anchura. En segundo lugar, a aquellos que aunque no contengan la unidad, tengan la menor anchura y se acerquen más a la unidad.

Otro criterio utilizado y que es considerado de mayor peso para la selección de mejor modelo es la suma de cuadrados del error ( $SCE = \sum (E_{t_{obs}} - E_{t_{est}})^2$ ), tomando como mejores modelos aquellos cuya suma de cuadrados sea menor.

**Calibración del modelo de hargreaves-Samani**

(García, 1985)

Se calibró el modelo Hargreaves-Samani utilizando datos de la estación de CENID-RASPA del año de 1993, se utilizó un procedimiento no lineal de SAS que estima el vector de parámetros en el modelo utilizando el criterio de hacer mínimas la suma de cuadrados de los errores ( $SCE = \sum (E_{tobs} - E_{tEst})^2$ ), en donde  $E_{tpest} = \beta_0 RA (T + \beta_1) TD^{0.5}$  mediante un método de Gauss-Newton.

## RESULTADOS Y DISCUSION

### Modelo regional I :

$$ET_p = -1.55776 + 0.25889 T_m - 0.21895 n + 0.03678 n^2$$

Donde:

ET<sub>p</sub> = Evapotranspiración potencial (mm)

T<sub>m</sub> = Temperatura media (°C)

n = Insolación (Horas)

Modelo regional II :

$$ET = -24.35679 + 2.4537 F + 1.47143 E + 0.01413 E^2 - 0.12779 FE$$

Donde:

ET = Evapotranspiración potencial (mm)

F = Fotoperiodo (Horas)

E = Evaporación (mm)

### Análisis de la evaluación de los modelos

En el Cuadro 1 se muestran los parámetros estadísticos de la regresión lineal simple. El intervalo de confianza se estableció de la forma: I.C. =  $\beta \pm 1.97 s\beta$

para un nivel de significancia  $\alpha = 0.05$  y con 363 grados de libertad (GL), de tal manera que  $P [t(363) \geq 1.97 = 0.025]$ .

En el cuadro 2 se muestra la suma de cuadrados del error ( $SCE = \sum (ET_{est} - ET_{obs})^2$ ) que representa otro criterio de selección.

Los coeficientes de correlación (R) que se observan en el cuadro 1 tienen un nivel de significancia de  $\alpha = 0.0001$  para cada uno de los modelos evaluados. En el cuadro podemos apreciar que ningún modelo empírico contiene dentro de su intervalo de confianza a la unidad. Todos los modelos presentan un intervalo por debajo de la unidad lo cual indica que todos subestimaron la evapotranspiración en mayor o menor grado.

Los modelos que presentan la menor anchura del intervalo de confianza del coeficiente de regresión (b) son: Rodríguez Zavaleta (0.05457), H. Samani (0.06313) y Penman (0.09456). Por otro lado, la suma de cuadrados del error (Cuadro 2) que muestran los modelos en orden de aceptación son: modelo II (1322.62), Penman (1340.53) y el modelo I (1473.45).

El modelo propuesto por Penman se encuentran entre los rangos más aceptables de predicción, este modelo presenta ventaja respecto a los demás modelos en cuanto a su intervalo de confianza del coeficiente de regresión (b) (0.09456), excepto a los modelos de H. Samani y al de J. Haise. Además la suma de cuadrados del error es menor a los demás modelos excepto al modelo II (1340.5350). Este modelo en general predice bien pero presenta el inconveniente de que requiere demasiada información agroclimática para su aplicación.

Cuadro 1.- Parámetros del análisis de varianza para cada uno de los modelos evaluados

Modelo	Coef. de correl. (R)	(b)	Límite inferior	Límite Superior	Anchura del I.C. para la estimación de (b)
J. Haise	0.7761	0.66051	0.60511	0.71590	0.11079
Evaporac.	0.7309	0.61253	0.55350	0.67155	0.11804
Modelo II	0.7615	0.55855	0.50949	0.60762	0.09812
Penman	0.7699	0.55273	0.50545	0.60001	0.09456
Modelo I	0.7307	0.51096	0.46169	0.56023	0.09854
H. Samani	0.7809	0.38242	0.35085	0.41398	0.06313
R.Zavaleta	0.7546	0.30407	0.27678	0.33136	0.05457

Cuadro 2.- Suma de cuadrados del error para cada modelo evaluado

	J.Haise	Evaporac.	ModeloII	Penman	ModeloI	H.samani	R.Zaval.
Σ de cuadrad. del Error	2895.974	4931.431	1322.625	1340.535	1473.456	1616.140	5409.137

El modelo II que se generó para la Comarca Lagunera, muestra la suma de cuadrados del error (Cuadro 2) más baja respecto a los demás modelos (1322.625), este modelo predice de manera aceptable la evapotranspiración.

#### Ajuste del modelo de hargreves - Samani

Los parámetros que fueron modificados fueron la Bo y B1 con los valores de 0.005003444 y - 0.819765929 respectivamente. De tal manera que el modelo calibrado queda de la forma:

$$ET_p = 0.0050034 \text{ RA } (T - 0.81976) \text{ TD}^{0.5}$$

Donde:

ET<sub>p</sub> = Evapotranspiración potencial (mm)

RA = Radiación solar (mm/día)

T = Temperatura media diaria (°C)

TD = T<sub>max</sub> - T<sub>min</sub>. (°C)

### CONCLUSIONES

De los dos modelos generados para las condiciones de la Laguna, resultó con mejor poder de predicción el modelo II.

Se puede obtener un modelo con mayor eficiencia en la estimación de la ET que los modelos I y II generados regionalmente utilizando una base de datos mayor a la utilizada en el presente trabajo.

El modelo calibrado Hargreaves Samani, resultó

con mayor poder de predicción que el modelo original y que los modelos evaluados y los generados para las condiciones de la Región.

El modelo de Penman también se puede utilizar en la región con resultados aceptables, siempre y cuando se cuente con suficiente información para alimentarlo.

### LITERATURA CITADA

- Aboukhaled, A. 1986. Los lisímetros. Estudio FAO de riego y drenaje. Roma, Italia.
- García, H.G. 1985. Tesis. Poder de predicción de 10 modelos empíricos para estimar la evapotranspiración. UAAAN. Saltillo, Coah.
- Gutiérrez, O. 1975. Introducción a la evaporación y evapotranspiración. SIDITA.
- Hillel D., S. Gairon; V. Falken Flug y E. Rawitz 1969. New design of a low cost hydraulic lysimeter sistem for fiel measurement evapotranspiration. Israel Jour of Agric. RES. Vol. 19.
- Infante G., S. y G. P. Zárate de Lara 1994. Métodos estadísticos. Un enfoque interdisciplinario. Ed. Trillas. México.
- Martínez G.A. y M. A. Castillo 1987. Teorías de la regresión con aplicaciones agronómicas. Colegio de postgraduados. Montecillos, Estado de México.
- INIFAP. 1986. Memorias sobre el taller de lisimetría y estudios de evapotranspiración. Gómez Palacio, Dgo.