

PRESIÓN DE VAPOR ACTUAL OBSERVADA Y ESTIMADA EN OBSERVATORIOS SINÓPTICOS DE MÉXICO*

ACTUAL VAPOR PRESSURE OBSERVED AND ESTIMATED IN SINOPTIC OBSERVATORIES OF MEXICO

Ramón Arteaga Ramírez^{1§}, Armando Aguirre Rodríguez¹, Dora Ma. Sangerman-Jarquín², Mario Alberto Vázquez Peña³, Laura Alicia Ibáñez Castillo³ y Teresa Marcela Hernández Mendoza³

¹Posgrado de Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua. Universidad Autónoma Chapingo. Carretera México-Texcoco, km 38.5. C. P. 56230. Texcoco, Estado de México. (tamus_01@hotmail.com). ²Campo Experimental Valle de México. INIFAP. Carretera Los Reyes-Lechería, km 18.5. C. P. 56230. Texcoco, Estado de México. (dsangerman@yahoo.com.mx). ³Departamento de Irrigación. Universidad Autónoma Chapingo. Carretera México-Texcoco, km 38.5. C. P. 56230. Texcoco, Estado de México. (mavp52@hotmail.com), (libanez@correo.chapingo.mx), (teresa_hdz2004@yahoo.com). [§]Autor para correspondencia: arteagar@correo.chapingo.mx.

RESUMEN

El objetivo de esta investigación fue evaluar cuatro métodos para calcular la temperatura del punto de rocío, y que a la vez estime la presión de vapor actual más próxima a la observada, en 73 observatorios sinópticos de México (periodo 1981-2000); considerando presión de vapor actual observada a la calculada con datos psicrométricos. Se compararon cuatro métodos para estimar la temperatura del punto de rocío, en el método 3 se realizó una clasificación con el índice de aridez de Martonne. Una vez obtenido el valor de presión de vapor actual empleando los cuatro métodos, se efectuó un análisis comparando valores estimados contra observados con las siguientes estadísticas: RE, R^2 , d, b y $R^{2'}$; posteriormente se determinó el método más adecuado para cada observatorio, el aceptado en el mayor número de observatorios es el recomendado en esta investigación. El método 2 fue más efectivo; también se realizó una regresión lineal con los datos del país para cada método, excepto para el 3, el cual se dividió en observatorios húmedos y áridos, se tomó como ordenada la temperatura del punto de rocío observada y como abscisa la temperatura del punto de rocío calculada; después se realizó otra regresión lineal entre la temperatura del punto de rocío observada y temperatura mínima para el país, en observatorios húmedos y áridos.

Con los valores mensuales de la presión de vapor actual del método 2 se obtuvo un mapa de isolíneas de la presión de vapor actual para cada mes, otro donde se muestran la ubicación de los observatorios en la república mexicana y un adicional donde se muestran los observatorios clasificados en húmedos y áridos.

Palabras clave: evapotranspiración, humedad relativa, Martonne, punto de rocío, regresión lineal.

ABSTRACT

The objective of this study was evaluate four methods to calculate the dew point temperature estimates the water vapor pressure actual most approximated to the observed one from 73 weather observatories in Mexico (period 1981-2000), considering water vapor pressure observed that calculated with psychrometric values. Four methods were compared to estimate the dew point temperature, in the method 3 a classification with the Martonne aridity index was done. And the value from the water vapor pressure actual gotten from five methods, an analysis was done with the next statistics

* Recibido: marzo de 2009
Aceptado: marzo de 2010

comparing the estimated values with observed ones: RE, R^2 , d, b y $R^{2'}$; later it was determined the most appropriated method in each observatory, the accepted in the major quantity of observatories is the recommended one in this search. The most approximated method was the 2; also a linear regression on the country for each method was done, except for method 3, this one was separated in wet observatories and dry ones, where the dew point temperature observed is taken as orderly and the dew point temperature calculated as abscissa, later a linear regression else was done between the dew point temperature observed and temperature minimum of the same way on the country and for wet observatories and dries ones. With month values of the water vapor pressure actual from method 2, a map was made with isolines of the water vapor pressure actual for each month, a map where the weather observatories locations are showed on mexican republic and one additional where the classified weather observatories in wet and arid are showed too.

Key words: dew point, evapotranspiration, linear regression, Martonne, relative humidity.

INTRODUCCIÓN

A pesar que la evapotranspiración es una variable muy importante para realizar diversos estudios en: riego, hidrología, meteorología, geohidrología, entre otros; aún falta investigación para que la medición o estimación de esta variable sea factible y aproximado a la realidad.

En investigaciones (Jensen *et al.*, 1990; Allen *et al.*, 2006) se ha probado que la expresión para estimar la evapotranspiración de referencia más aproximada al valor medido en lisímetros de precisión es la de Penman-Monteith, y para obtener dicha expresión es necesario calcular el déficit de saturación, el cual se determina mediante la diferencia de la tensión de vapor a saturación y la tensión de vapor actual.

La presión de vapor actual (e_a) es escasamente reportada a pesar de la importancia que tiene; a nivel nacional sólo se muestran los valores para calcularla en las normales climatológicas de los observatorios sinópticos. En uno de los métodos para estimar la presión de vapor actual se necesita la temperatura del punto de rocío (T_d), ésta la definen Jensen *et al.* (1990) como la temperatura de una muestra de aire, en el cual la presión de vapor es igual a la presión de vapor a saturación.

Para calcular la tensión de vapor actual existen varios métodos; pero de éstos no existe información sobre cuál es el más adecuado en México, es por ello que en este estudio se realizó un análisis para definir de cuatro métodos disponibles cual es el más adecuado, para el cálculo de esta variable importante en la estimación de la evapotranspiración, que también depende de la calidad y cantidad de los datos disponibles.

MATERIALES Y MÉTODOS

En la Figura 1 realizada con ArcGIS 9.2, se muestra la ubicación de los observatorios utilizados en este trabajo.

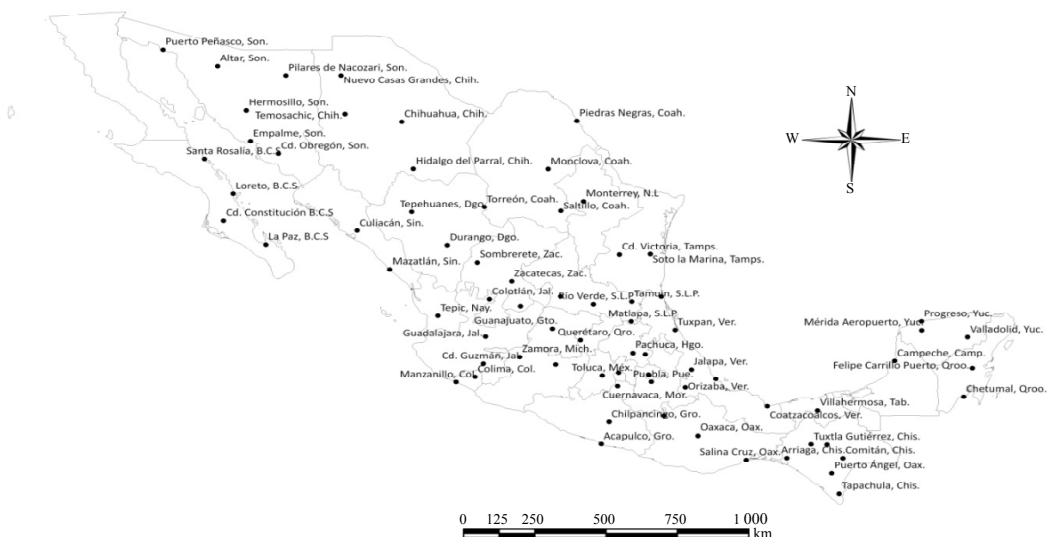


Figura 1. Ubicación de los observatorios en la república mexicana.

Para realizar este proyecto, a través de internet se descargó las normales climáticas de los observatorios sinópticos del período de 1981-2000 (SMN, 2009). Como las normales se encontraban en formato PDF, con el programa solid converter se transformaron las tablas a formato de Microsoft Excel 2007, para poder realizar los cálculos respectivos. La escritura de la investigación se condujo en el programa Microsoft Word 2007, y la base de datos con las operaciones matemáticas en Microsoft Excel 2007.

Para la localización geográfica de los observatorios sinópticos y el cálculo de isóneas de presión de vapor actual (e_a) en cada mes, se concentró las coordenadas y los valores de e_a mensuales de todos los observatorios en una tabla de Excel.

Métodos

Antes de realizar los cálculos se debe contar con la información contenida en las normales climatológicas en una hoja de Excel, de esa forma el procesamiento es más rápido; ya que una vez hecho la hoja de cálculo para un observatorio, ésta misma se utiliza para los restantes. En primer lugar se calcularon los valores de T_d mediante las fórmulas de cada uno de los cuatro métodos, posteriormente se calculó con estos valores, el valor de la presión de vapor actual mensual estimada para todos los observatorios sinópticos de México (Calado *et al.*, 1990; Van Leeuwen *et al.*, 2001; Ajayi *et al.*, 2004; Cai *et al.*, 2006).

Método 1

Expresión mencionada por Linsley *et al.* (1988).

$$T_d = T - [(14.55 + 0.114T)X + [(2.5 + 0.007T)X]^3 + (15.9 + 0.117T)X^{14}] \quad (1)$$

Donde, T_d = temperatura del punto de rocío (°C); T = temperatura del aire o del bulbo seco (°C); $X = 1 - \frac{HR}{100}$; HR = humedad relativa (%).

Método 2

Expresión de Bosen citada por Allen *et al.* (2006).

$$T_d = \sqrt[8]{\frac{HR}{100}} * (112 + 0.09T) + 0.1T - 112 \quad (2)$$

Donde, T_d = temperatura del punto de rocío (°C); HR = humedad relativa (%); T = temperatura del aire o del bulbo seco (°C).

Método 3

Expresión en el manual 56 de la FAO (Allen *et al.*, 2006).

$$T_d = T_{\min} - K_o \quad (3)$$

Donde, T_d = temperatura del punto de rocío (°C); T_{\min} = temperatura mínima (°C); $K_o = 0^\circ \text{C}$ en climas húmedos y sub-húmedos y $K_o = 2^\circ \text{C}$ en climas áridos y semiáridos.

Para conocer si el observatorio es húmedo o árido se clasifica el observatorio mediante la siguiente expresión (Rivas-Martínez, 2008).

$$I_a = \frac{P}{T + 10} \quad (3.1)$$

Donde, P =precipitación anual (mm); T = temperatura media anual (°C); I_a = índice de aridez de Martonne ($\text{mm } ^\circ\text{C}^{-1}$). Se sustituye P y T de cada observatorio en la ecuación 3.1 y si el valor de $I_a > 20$ se considera húmedo y se asigna el valor $K_o = 0^\circ \text{C}$; si el valor de $I_a \leq 20$ entonces se considera árido dándole el valor $K_o = 2^\circ \text{C}$.

Método 4

Expresión de Murray citada por Howell y Dusek (1995).

$$T_d = \frac{1}{\left\{ \frac{1}{\left[\frac{\ln\left(\frac{HR}{100}\right)}{17.27} \right] + \left[\frac{T}{(237.3 + T)} \right]} \right\} - 1} \quad (4)$$

Donde, T_d = temperatura del punto de rocío (°C); HR = humedad relativa (%); T = temperatura del aire o del bulbo seco (°C).

Estimación la presión de vapor actual (e_a) a partir de la temperatura del punto de rocío

Allen *et al.* (2006) mencionan que la temperatura del punto de rocío, es la temperatura a la cual el aire necesita

ser enfriado para saturarlo, la presión real de vapor (e_a) expresada en kPa, es la presión de vapor a saturación a la temperatura del punto de rocío (T_d).

$$e_a = e(T_d) = 0.611 e^{\left(\frac{17.27 T_d}{T_d + 237.3}\right)} \quad (5)$$

Consecuente, se sustituyen los valores de T_d de cada método en la ecuación 5, para obtener los valores estimados de e_a en cada observatorio con los cuatro métodos (Novak *et al.*, 1997; Şimşek *et al.*, 2005; Orta *et al.*, 2006).

Expresión para calcular la presión de vapor actual (e_a) observada a partir de datos psicrométricos

La presión de vapor actual puede determinarse de la diferencia entre la temperatura del termómetro bulbo seco y del bulbo húmedo conocida como la depresión del bulbo húmedo (Allen *et al.*, 2006). La relación se expresa por la siguiente ecuación:

$$e_a = e(T_w) - \gamma_{\text{psi}}(T - T_w) \quad (6)$$

Donde, e_a = presión real de vapor (kPa); $e(T_w)$ = presión de vapor a saturación a la temperatura del bulbo húmedo (kPa); γ_{psi} = constante psicrométrica ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$); $(T - T_w)$ = depresión del bulbo húmedo; T = temperatura del termómetro de bulbo seco ($^\circ\text{C}$); T_w = temperatura del termómetro de bulbo húmedo ($^\circ\text{C}$).

La constante psicrométrica del instrumento está dada por:

$$\gamma_{\text{psi}} = a_{\text{psi}} P \quad (6.1)$$

Donde, $a_{\text{psi}} = 0.000662$ ($^\circ\text{C}^{-1}$); P = presión atmosférica (kPa). Para obtener e_a observada, primero se sustituye el valor de P del observatorio en la ecuación 6.1 y se obtiene γ_{psi} ; después se obtiene la diferencia entre T y T_w ; se sustituye el valor de T_w en la ecuación 5 en lugar de T_d .

Análisis estadístico

Teniendo la e_a observada y la e_a estimada de cada estación se hizo el análisis estadístico mediante cinco índices de ajuste el RE, d , R^2 , b y R^2 . Se recuerda que el cálculo de cada estadística es en cada observatorio (Wanjura *et al.*, 1990; Linsley *et al.*, 1998; Van Leeuwen *et al.*, 2001).

Índice de ajuste RE

$$RE = \frac{RMSE}{\bar{O}} \quad (7)$$

Donde, \bar{O} = es el promedio de los valores observados O_i con $i = 1, 2, 3, \dots, m$; RMSE = raíz cuadrada del cuadrado medio del error.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m (E_i - O_i)^2}{m}} \quad (7.1)$$

Donde, m = número de observaciones; O_i y E_i = son respectivamente el i -ésimo dato observado con los datos psicrométricos y el estimado con alguno de los cuatro métodos. Con esta estadística se acepta el modelo con valores de $RE \leq 0.20$, se busca que sea lo más cercano a cero dando un rango de 0.20 para aceptar el modelo (Cai *et al.*, 2007). Resulta adecuado para comparar la variabilidad de los métodos empleados, ya que relaciona la RMSE de cada valor estimado (para cada uno de los métodos) con un mismo promedio, al de los valores observados (Itier *et al.*, 1993; Anconelli *et al.*, 1994; Tom *et al.*, 2001). Como se observa en la ecuación 7, primero se calcula el valor de RMSE (ecuación 7.1) y se divide entre \bar{O} ; el valor de RMSE se obtiene de la raíz cuadrada del cociente de la sumatoria de las diferencias de O_i y E_i al cuadrado y el valor de m .

El coeficiente de determinación, R^2

$$R^2 = \frac{[\sum (E_i - \bar{E})(O_i - \bar{O})]^2}{\sum (E_i - \bar{E})^2 \sum (O_i - \bar{O})^2} \quad (8)$$

Donde, \bar{E} y \bar{O} son los promedios del arreglo de datos i -ésimo O_i y E_i . Este estadístico es un indicador menos flexible que el coeficiente de correlación, ya que al elevar al cuadrado un valor menor que la unidad el resultado es un valor más pequeño. Para aprobar un modelo mediante este estadístico se debe cumplir $R^2 \geq 0.8$ y lo más cercano a la unidad (Cai *et al.*, 2007).

Primero se estiman los promedios de O y E , después se obtienen las diferencias y sumatorias respectivas que muestra la ecuación 8, para obtener el cociente que presenta dicha ecuación y de esa manera se obtiene el valor de R^2 .

Índice Willmott de correspondencia, d

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^m (E_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^m (|E'_i| + |O'_i|)^2} \quad (9)$$

Donde, $|E'_i| = E_i - \bar{O}$ y $|O'_i| = O_i - \bar{O}$. Si el valor de $d \geq 0.95$ es aceptado, pero debe ser lo más cercano a la unidad; con esto se busca que los errores elevados al cuadrado entre la suma elevada al cuadrado de las desviaciones de los valores estimados (E_i) y observados (O_i) con respecto a la media de los valores observados (\bar{O}) sea lo más aproximada a cero (Anconelli *et al.*, 2000; Cai *et al.*, 2007). Para encontrar el valor de este estadístico simplemente se sustituyen en la ecuación 9 los valores de E_i y O_i , conociendo que \bar{E} y \bar{O} son sus promedios respectivos.

Índices b y R^2 obtenidos mediante la regresión lineal simple que pasa por el origen (RLSO)

El modelo de regresión lineal simple que pasa por el origen, es aquel que en la realidad es posible que la variable independiente tome valores igual o alrededor de cero y por lo tanto, la variable dependiente tendrá también valores de cero. Infante y Zarate de Lara (2005), establecieron que la relación E y O puede modelarse mediante una línea recta.

$$E_i = (O_o + m)(O_i + \varepsilon_i) \quad \text{con } i=1, 2, 3, \dots, n \quad (10)$$

Donde, O_o = ordenada al origen; m = pendiente de la recta o coeficiente de regresión; ε_i = i -ésimo error; O_i = i -ésimo valor observado; E_i = i -ésimo valor estimado; n = total de datos.

Para obtener los valores de O_o y m se utiliza la metodología de mínimos cuadrados, a través de las siguientes ecuaciones.

$$m = \frac{\sum_{i=1}^n [O_i - \bar{O}] (E_i - \bar{E})}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (10.1)$$

$$O_o = \bar{E} - m\bar{O} \quad (10.2)$$

Donde, \bar{E} = media de los valores estimados (E_i); \bar{O} = media de los valores observados (O_i). Para que tenga una aplicación práctica (que se ajuste a RLSO) el O_o debe ser posible que físicamente la variable O pueda tomar el valor de cero. Se hallan colectado datos alrededor de $O=0$, (valores cercanos a cero). El valor de m se obtiene con la siguiente ecuación.

$$m = \frac{\sum_{i=1}^n O_i * E_i}{\sum_{i=1}^n O_i^2} \quad (10.3)$$

El valor de la pendiente de la recta (m) obtenido al realizar la regresión, será el valor de b y su coeficiente de determinación será R^2 , por lo tanto se expresa el modelo de RLSO.

$$E_i = b * O_i + \varepsilon_i \quad \text{con } i=1, 2, 3, \dots, n \quad (10.4)$$

Se podría utilizar la ecuación 10.4 para obtener b , pero para mayor facilidad se realizó la regresión lineal al origen graficando los valores estimados (ordenadas) contra los observados (abscisas) y entre más cercano a 1 sea el estadístico el modelo se aceptará; mediante este coeficiente el modelo tendrá un rango de aceptación de 10% (1 ± 0.1), un valor de $b=1$, quiere decir que los valores de E_i tienden a ser iguales a los O_i (Cai *et al.*, 2007). Una vez realizado el análisis estadístico de todos los observatorios sinópticos, se concentraron los resultados de presión de vapor actual y de índices estadísticos, para tomar la decisión del método más apropiado para calcular la temperatura del punto de rocío y por consiguiente para estimar la presión de vapor actual. Se seleccionó como el método más apropiado aquel que cumplió con el mayor número de índices aceptables; si hay dos iguales, se escoge el que más se acerque a las condiciones ideales que se reporta en la literatura.

De la ecuación 5 se despeja T_d (se denotará como $T_{d \text{ obs}}$) y se sustituyen los valores de $e_{a \text{ obs}}$; junto con los valores de $T_{d \text{ est}}$ y los T_{min} de los observatorios de México con sus características (clave, nombre, latitud, longitud, altitud y clima). Una vez organizados, se graficaron en el eje de las abscisas la T_d y en el eje ordenado la $T_{d \text{ obs}}$ de todo el país para cada método; el método 3 se analizó por separado los observatorios húmedos y los áridos, pero se siguió el mismo procedimiento, se realizó una regresión lineal y se obtuvo la ecuación de la línea de tendencia y su R^2 , de esta forma se obtiene el valor de la pendiente (a) y el de la ordenada al origen (b). Después se realizaron tres regresiones lineales entre la $T_{d \text{ obs}}$ y la T_{min} para obtener los coeficientes del método 3 (C y K_o) en el país y para los observatorios clasificados en áridos y húmedos.

Se utilizó ArcGis 9.2 para ubicar geográficamente los observatorios en un mapa de la república mexicana con su cuadro de características, el cual tiene también la presión de vapor actual de cada mes para cada observatorio. De

la misma forma, se realizó un mapa donde se muestra los observatorios húmedos y los áridos. Se construyó un mapa de isolíneas de presión de vapor actual del método 2 para cada mes (Jackson, 1993).

ANÁLISIS Y RESULTADOS

Selección del método de estimación adecuado

En la Figura 2, se observa que algunos métodos fueron más aceptados con base al estadístico de prueba, el que resultó

menos estricto es “d”, por el porcentaje más alto mientras que “b” fue el más riguroso, razón por la cual, cuando se tenía dos, tres o los cuatros métodos con la misma cantidad de índices aceptados, se seleccionaba el que tuviera el valor de b más cercano a 1. Se destaca que los observatorios de Villahermosa, Tabasco y Colotlán, Jalisco; tuvieron valores muy dispersos entre e_a estimada con respecto a la e_a observada (Irmak, 2000).

En la Figura 3 se muestra que del total de observatorios analizados, el método 2 fue mejor con 43% de aceptación y siguió el 3, 1 y 4 con 23%, 19% y 15% respectivamente.

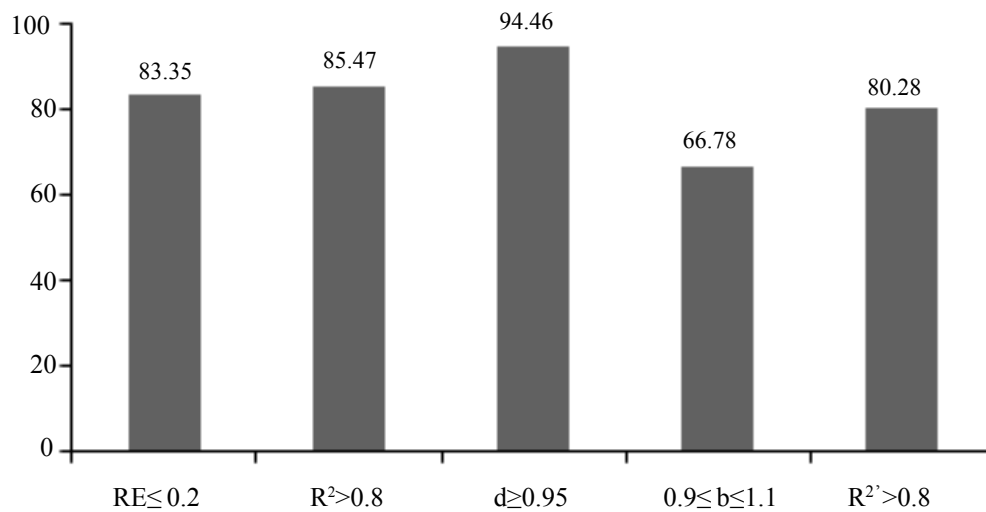


Figura 2. Porcentaje de aceptación de la e_a de acuerdo a los índices estadísticos utilizados.

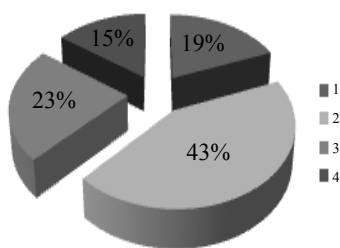


Figura 3. Proporción de los métodos estudiados en el total de observatorios.

Ahora del 19% de observatorios aceptados con el método 1, el 21% son regiones áridas, mientras que el 79% son húmedas (Figura 4). Para el caso del método 2, de 43%de

observatorios aceptados; 55% son regiones húmedas que corresponden a 23.7% del total de observatorios, mientras que 45% son áridas teniendo 19.3% del total (Figura 5).

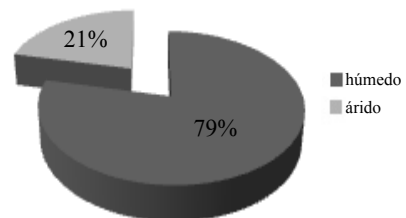


Figura 4. Proporción de observatorios húmedos y áridos para la aceptación del método 1.

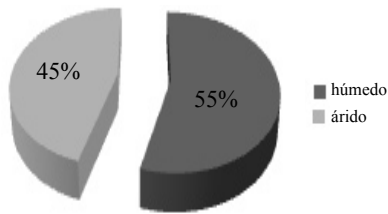


Figura 5. Proporción de observatorios húmedos y áridos para la aceptación del método 2.

Para el método 3, de 23% de observatorios aceptados 41% son regiones áridas que corresponden a 9.4% del total de observatorios, mientras que 59% corresponde a húmedas (Figura 6). En el método 4; 15% de observatorios aceptados, 55% son regiones húmedas que corresponden a 8.3% del total de observatorios, mientras que 45% son áridas teniendo 6.7% del total (Figura 7).

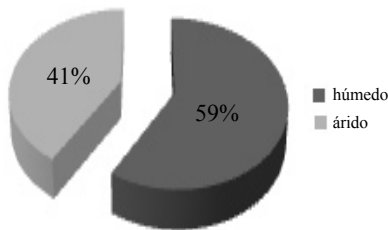


Figura 6. Proporción de observatorios húmedos y áridos para la aceptación del método 3.

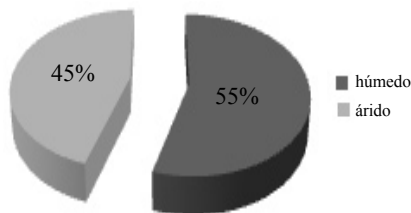


Figura 7. Proporción de observatorios húmedos y áridos para la aceptación del método 4.

En resumen, del total de observatorios 60% son húmedos y 40% son áridos (Figura 8). También se destaca que del total de observatorios húmedos el método 1 y 3 tienen casi la misma cantidad de aceptación con 25% y 23%, mientras que 38% de aceptación la tiene el método 2 y al final de la lista está el método 4 con 14% (Figura 9). Analizando las regiones áridas el primer lugar de aceptación lo sigue teniendo el método 2 con 48%, le

sigue el método 3 con 24%, el método 4 con 17% y por último el método 1 con 11% (Figura 10), siendo éste el menos adecuado para las zonas áridas.

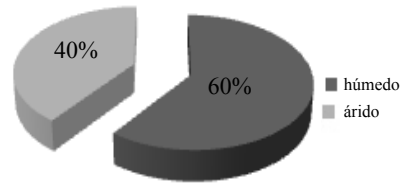


Figura 8. Observatorios húmedos y áridos.

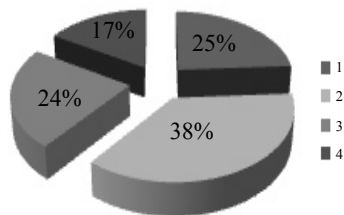


Figura 9. Observatorios húmedos.

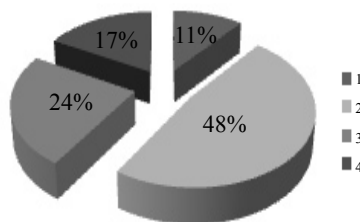


Figura 10. Observatorios áridos.

Al parecer el método 4 y el 1 no son muy confiables para calcular la temperatura del punto de rocío; pero siempre los valores entre el método 2, 4 y el 1 estuvieron muy cercanos, presentando el método 4 valores intermedios entre el método 1 y 2; mientras que el método 3 era el más lejano. En la mayoría de las ocasiones el método 3 fue el más aceptado con respecto al observado, los valores del método 2, 4 y 1 son diferentes con relación al método 3.

Obtención de nuevas ecuaciones

De la ecuación 5 se despeja T_d para encontrar los valores observados de la temperatura del punto de rocío ($T_{d,obs}$) en el país. Para reforzar los resultados, se compararon los valores de $T_{d,obs}$ y los de T_d mediante una regresión lineal, de esa forma se encontraron los siguientes parámetros:

Cuadro 1. Parámetros estadísticos para comparar la T_d observada y T_d estimada con los cuatro métodos.

Método	Parámetros		
	b	a	R ²
1	1.072	-1.501	0.945
2	1.073	-1.405	0.945
3 (árido)	0.783	2.06	0.65
3 (húmedo)	0.869	2.107	0.863
4	1.007	-0.322	0.896

Donde el valor de b es la pendiente de la recta y entre más cercano esté a la unidad es mejor; la a es la ordenada al origen, ésta debe ser cercana a cero y por último el R², el cual entre más cercano a uno esté, mayor será la relación entre los pares de valores. Priorizando los parámetros a y b el método que más se aproxima a los valores de $T_{d\text{obs}}$ es el método 4, siguiendo el método 2, luego el método 1 y por último el método 3. Sin embargo, cuando se estima la presión de vapor actual con cada método se encuentra que el método 2 es el más adecuado. Se realizó una regresión lineal entre los valores de $T_{d\text{obs}}$ y T_{min} del país (áridos y húmedos) para hacer una modificación a la fórmula del método 3. A continuación se presenta la Figura 11 de la regresión lineal con su respectiva ecuación.

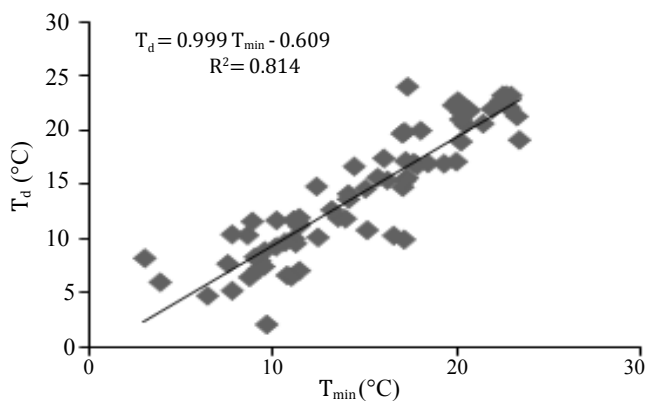


Figura 11. Regresión lineal entre la T_{min} y la $T_{d\text{est}}$ obtenida de la e_a observada para el país.

La ecuación que se buscó es del tipo.

$$T_d = CT_{\text{min}} + K_o \quad (11)$$

Donde, T_d = temperatura del punto de rocío (°C); T_{min} = temperatura mínima (°C); C = coeficiente de T_{min} ; K_o =

ordenada al origen (°C). A continuación se presenta la ecuación encontrada mediante la regresión lineal para el país, sin tener que hacer clasificación de aridez con $R^2 = 0.814$.

$$T_d = 0.999T_{\text{min}} - 0.609 \quad (11.1)$$

Se efectuó el mismo análisis, con los observatorios clasificados de acuerdo al índice de aridez de Martonne, obteniendo una ecuación para zonas áridas y otra para zonas húmedas; con el fin de encontrar los mismos parámetros de regresión y en este caso para verificar cual es el valor más adecuado de la región árida o húmeda.

Se obtuvo la siguiente ecuación para las zonas áridas, sin embargo, la R² está por debajo del 0.8 recomendado; esto da a entender que en estas zonas existe otro factor muy importante en el ambiente a parte de la temperatura del lugar (Howele, 1995).

$$T_d = 0.829T_{\text{min}} + 0.609 \quad (11.2)$$

En contraste, en los observatorios de las regiones o zonas húmedas, se encontró la $R^2 = 0.863$ con una ecuación, donde el valor de C es cercano a la unidad y K_o es próximo a cero.

$$T_d = 0.993T_{\text{min}} + 0.130 \quad (11.3)$$

Este resultado es muy similar a lo que reportan Allen *et al.* (2006), que el valor de la temperatura del punto de rocío en zonas húmedas es muy semejante a la temperatura mínima.

Elaboración de mapas

Si volvemos a la Figura 1, se observa que la distribución de los observatorios no es uniforme a lo largo del país y que alrededor de 30% de éstos se encuentran muy cercanos a las costas, posiblemente se debió a la interpolación que hace ArcGis 9.2, para elaborar las isolíneas de presión de vapor actual mensual.

En la Figura 12 se presenta la clasificación de región árida obtenida con el índice de aridez de Martonne de los observatorios sinópticos de México, se puede ver claramente que la latitud del estado de San Luis Potosí hacia el norte existe aridez, excepto el estado de Tamaulipas y de la mitad sur del estado de Sinaloa son húmedos; como dato curioso, en esta franja de transición

entre región húmeda y árida aproximadamente está el trópico de cáncer. En la parte sur del país sólo en Oaxaca y en parte de Hidalgo es donde se presenta aridez, fuera de esos puntos todos los demás se muestran como zonas húmedas.

Únicamente se presenta la Figura 13, que corresponde a las isolíneas de presión de vapor actual del mes de enero y relacionando la Figura 12 con la Figura 13 se observa que en las zonas húmedas es donde se presentan los valores máximos de e_a .

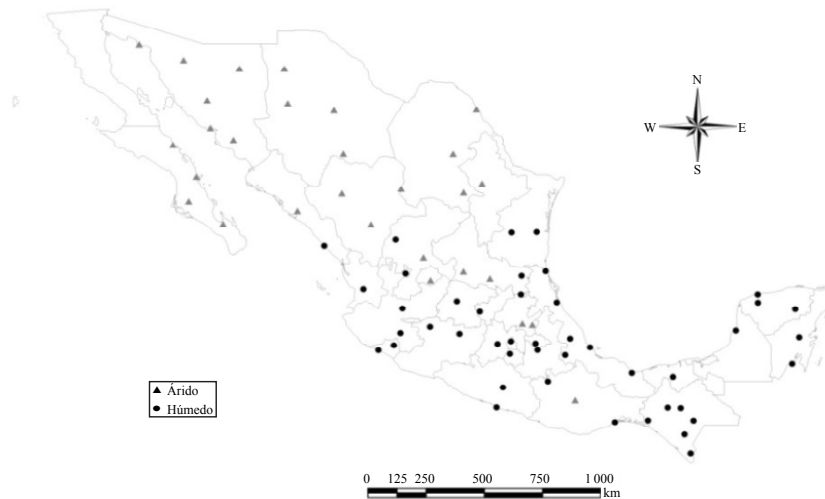


Figura 12. Observatorios de México clasificados conforme al índice de aridez de Martonne.

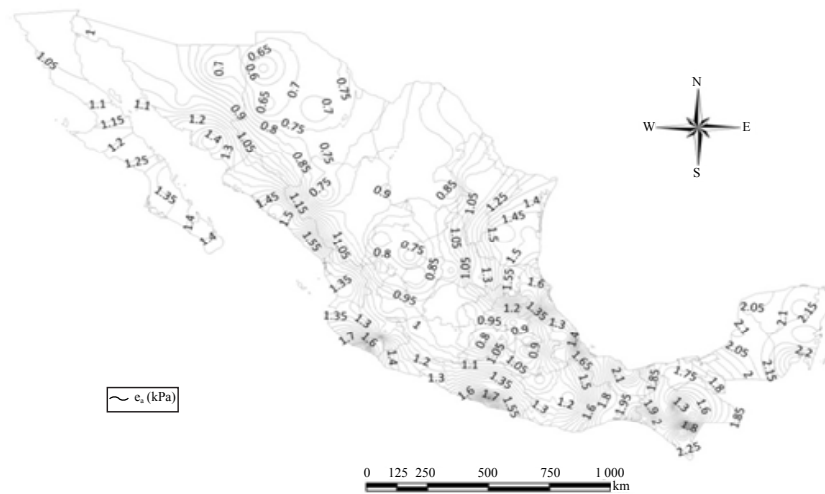


Figura 13. Presión de vapor actual estimada en el mes de enero.

CONCLUSIONES

El método más adecuado para estimar la temperatura del punto de rocío, fue el método 2 correspondiendo a la ecuación 2, superando al método 4, 1 y 3 al comparar sus valores estimados de presión de vapor actual con los observados.

Con el método 4 y 1 se obtienen valores muy aproximados a los calculados con el método 2; sin embargo, al hacer la comparación con los valores observados, el método 3 obtuvo el segundo lugar de cantidad de observatorios aceptados de acuerdo a los índices estadísticos.

Se obtuvieron las ecuaciones modificadas 11.1 y 11.3 del método 3 para realizar el cálculo de T_d en México y para regiones húmedas respectivamente; posteriormente se pueden utilizar para obtener la e_a con la ecuación 5. En el norte de México se encontraron valores bajos de e_a durante el año, mientras en el sureste valores altos.

Se obtuvo una clasificación de aridez de los observatorios sinópticos de México muy aceptable, comparados con el índice de aridez de Martonne.

LITERATURA CITADA

- Ajayi, A. E. and Olufayo, A. A. 2004. Evaluation of two temperature stress indices to estimate grain sorghum yield and evapotranspiration. *Agron. J.* 96:1282-1287.
- Allen, R. G.; Pereira, L. S.; Raes, D. y Smith, M. 2006. Evapotranspiración del cultivo: guía para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Estudio FAO de riego y drenaje. Vol. 56. FAO, Roma. 323 p.
- Anconelli, S. and Battilani, A. 2000. Use of leaf temperature to evaluate grapevine (*Vitis vinifera*) yield and quality response to irrigation. *Acta Hort.* 537:124-138.
- Anconelli, S.; Mannini, P. and Battilani, A. 1994. CWSI and baseline studies to increase quality of processing tomatoes. *Acta Hort.* 376:303-306.
- Barbosa da Silva, B. and Ramana, R. T. A. 2005. The CWSI variations of a cotton crop in a semi-arid region of northeast Brazil. *J. Arid Environ.* 62:649-659.
- Buchner, R. P.; Goldhamer, D. A. and Shaw, D. A. 1994. Irrigation scheduling in kiwifruit growing and handling, *In*: Hasey J. K.; Johnson, R. S.; Grant, J. A. and Reil, W. O. (eds.). University of California. 43-49 pp.
- Cai, J.; Yu, L.; Tingwu, L. and Pereira, L. S. 2007. Estimating reference evapotranspiration with the FAO Penman-Monteith equation using daily weather forecast messages. *Agricultural and Forest Meteorology.* Elsevier. 347:169-180.
- Calado, A. M.; Monzon, A.; Clark, D. A.; Phene, C. J.; Ma, C. and Wang, Y. 1990. Monitoring and control of plant water stress in processing tomatoes. *Acta Hort.* 277:129-136.
- Erdem, Y.; Erdem, A. T.; Orta, H. and Okursoy, H. 2005. Irrigation scheduling for watermelon with crop water stress index (CWSI). *J. Central Eur. Agric.* 6:449-460.
- Howell, A. T. and Dusek, A. D. 1995. Comparison of vapor-pressure-deficit calculation methods-southern high plains. *J. of Irrigation and Drainage Engineering.* 12(2):113-119.
- Infante, G. S. y Zárata de Lara, G. P. 2005. Métodos estadísticos. Trillas. México. 643 p.
- Irmak, S.; Hamman, D. Z. and Bastug, R. 2000. Determination of crop water stress index for irrigation timing and yield estimation of corn. *Agron. J.* 92:1221-1227.
- Itier, B.; Flura, D. and Belabbes, K. 1993. An alternative way for CWSI. Calculation to improve relative evapotranspiration estimates results of an experiment over soybean. *Acta Hort.* 335:333-340.
- Jackson, R. D.; Idso, S. B.; Reginato, R. J. and Pinter Jr, P. J. 1981. Canopy temperature as a crop water stress indicator. *Water Resour. Res.* 17:1133.
- Jensen, M. E.; Burman, R. D. and Allen, R. G. 1990. Evapotranspiration and irrigation water requirements. ASCE. Manuals and reports on engineering practices No. 70. Am. Soc. Civ. Eng. New York, EUA. 360 p.
- Linsley, R. K.; Kohler, M. A. y Paulhus, J. L. H. 1988. Hidrología para Ingenieros. Mc Graw-Hill/ Interamericana de México. México. 386 p.
- Nielsen, D. C. 1990. Scheduling irrigations for soybeans with the crop water stress index (CWSI). *Field Crops Res.* 23:103-116.
- Novak, V. A. 1997. Phitomonitoring in plant physiology. Arrangement and possibilities. *Russian J. Plant Physiol.* 44:121-128.
- Orta, A. H.; Erdem, Y. and Erdem, T. 2003. Crop water stress index for watermelon. *Sci. Hort.* 98:121-135.
- Rivas-Martínez, S. 2008. Otros índices bioclimáticos. Centro de Investigaciones Fitosociológicas. URL: <http://www.globalbioclimatics.org>.
- Servicio Meteorológico Nacional (SMN). 2009. Observatorio sinóptico. Normales climatológicas. URL: <http://smn.cna.gob.mx/observatorios/rhistorico.html>.

- Şimşek, M.; Tonkaz, T.; Kaçira, M.; Çömlekçioğlu, N. and Doğan, Z. 2005. The effects of different irrigation regimes on cucumber (*Cucumis sativus* L.) yield and yield characteristics under open field conditions. *Agric. Water Manag.* 73:240-252.
- Ton, Y.; Kopyt, M. K. and Nilov, N. 2001. Phytomonitoring technique for tuning irrigation of vineyards. International symposium on irrigation and water relations in grapevine and fruit trees. Mendoza, Argentina. 147-168 pp.
- Van Leeuwen, C.; Chone, X.; Tregoat, O. and Gaudillere, J. P. 2001. The use of physiological indicators to assess vine water uptake and to manage vineyard irrigation. *The Australian Grapegrower and Winemaker.* 449:18-24.
- Wanjura, D. F.; Hatfield, J. L. and Upchurch, D. R. 1990. Crop water stress index relationship with crop productivity. *Irrig. Sci.* 11:93-99.