

Estimación de la evaporación mensual en tanque tipo A en la república mexicana mediante datos de temperatura

Daniel Francisco Campos-Aranda

Universidad Autónoma de San Luis Potosí, México

Con base en los 17 observatorios meteorológicos de la república mexicana que cuentan con registros de evaporación mensual (E) en tanques evaporímetro tipo A, se calibró por medio de optimización numérica no restringida una fórmula empírica del tipo: $E = \alpha \cdot R_E^{\beta} + \gamma \cdot DEV^{\epsilon} + C_0$, en la cual R_E es la radiación solar extraterrestre, DEV es el déficit de vapor y C_0 es un término de corrección obtenido a través de la validación de la fórmula. La ecuación propuesta tiene un error estándar medio de 24.1 mm/mes. Posteriormente, se buscó una relación entre las temperaturas mensuales de punto de rocío y la mínima, para evitar el uso de los registros de humedad relativa que son bastante escasos, únicamente 54 en el país; con este nuevo planteamiento se dedujeron otras correcciones. La fórmula empírica propuesta tiene una capacidad predictiva aceptable en localidades con altitud mayor de mil metros sobre el nivel del mar (msnm), de acuerdo con el contraste que se realizó en cincuenta estaciones climatológicas del país, y no es recomendable en las regiones costeras, en las cuales en general sobreestima la evaporación observada. También se propone una fórmula empírica para estimación de la evaporación promedio anual en tanque tipo A, haciendo uso únicamente de la latitud del lugar y de los valores respectivos de temperatura media y mínima. Esta última ecuación conduce a resultados similares a los de la fórmula de estimación mensual previamente deducida.

Palabras clave: evaporación, fórmula empírica, optimización numérica.

Introducción

La evaporación es una componente significativa de la transferencia de masa y energía a la atmósfera. El término evaporación está reservado por los hidrólogos para designar la pérdida de humedad desde una superficie de agua libre, tal como los lagos, embalses, ríos y superficies sin cubierta vegetal, ya que para áreas de terreno que tienen vegetación, su pérdida de agua se denomina evapotranspiración (Boucher, 1997).

El método más común de medición de la evaporación es por medio del tanque evaporador denominado Clase A del *US Weather Bureau*, el cual consiste en una cubeta de 122 cm de diámetro y 26 cm de altura, que descansa sobre un enrejado de madera que separa su borde

superior del suelo 40.5 cm. El nivel del agua es mantenido a 5 cm de su borde y cada día se mide la diferencia de nivel que representa la evaporación, cuando no ocurrió precipitación (Boucher, 1997).

Con bastante frecuencia, las estaciones climatológicas no están equipadas con el tanque evaporador debido principalmente a la escasez del agua y al costo de este equipo. Sin embargo, la necesidad de contar con registros de evaporación mensual surge en todos los estudios hidrológicos encaminados a diseñar proyectos de aprovechamiento de los recursos hidráulicos, como son los embalses, y en aquellos tendientes a la evaluación del funcionamiento hidrológico de todo tipo de lagos naturales.

Por lo anterior, es importante contar con procedimientos expeditos que permitan una estimación aproxi-

mada de la evaporación mensual. Desde hace varias décadas se han deducido fórmulas que resuelven el problema, por ejemplo, Linacre (1977) propuso una ecuación de base física deducida, simplificando la fórmula de Penman, por lo tanto permite estimar la evaporación de una superficie de agua libre, la cual se basa exclusivamente en las temperaturas media y extremas, y cuya capacidad predictiva, según su autor, es bastante aceptable, con valores que difieren en promedio de los medidos en 0.30, 0.50 y 0.90 mm/d, en los niveles promedio anual, mensual y semanal, respectivamente.

En este trabajo se aborda de manera diferente la búsqueda de una fórmula empírica, ya que primero se revisa la relación causa-efecto de los elementos climáticos que se conocen determinan la evaporación, como es el caso de la radiación solar incidente, la humedad relativa y las temperaturas del aire. Posteriormente, se aplica y valida una fórmula con base física, que suma los efectos de los dos elementos climáticos más importantes: la radiación o energía disponible, y la sequedad del ambiente, ya que ambos sostienen y controlan la intensidad del proceso evaporativo (Shuttleworth, 1993).

Información climatológica utilizada

Datos de evaporación disponibles

En la publicación *Normales climatológicas* (SMN, 1982) se presenta la información climatológica de 54 observatorios meteorológicos, de los cuales únicamente 16 cuentan con registros de evaporación en el tanque tipo A y de éstos, tres no disponen de mediciones de horas de insolación. En el cuadro 1 se enlistan sus características geográficas generales y sus valores promedio anual de evaporación (E), radiación solar incidente (Ri), humedad relativa (HR) y temperaturas máxima (T), media (Tt) y mínima (t). Con el objeto de ampliar la información utilizada, se incluyeron dos registros meteorológicos que han sido previamente publicados y analizados: el del observatorio de Montecillo (López et al., 1989) y de la Escuela de Agronomía de la UASLP (Campos, 1989).

Análisis gráfico selectivo

Con base en los datos del cuadro 1 se construyeron gráficas con la evaporación en las ordenadas y la

Cuadro 1. Datos generales de los observatorios meteorológicos de la república mexicana que cuentan con registros de evaporación promedio mensual, según las normas climatológicas (SMN, 1982).

Núm.	Nombre	Longitud (° WG)	Latitud (° N)	Altitud (nsnm)	Evap. (mm)	Ri § (ly/d)	HR (%)	T (°C)	Tt (°C)	t (°C)
1*	Piedras Negras, Coah.	100° 31'	28° 42'	220	2,194.7	425	66	28.6	21.6	15.7
2*	Saltillo, Coah.	100° 59'	25° 27'	1,609	2,149.2	477	62	24.5	17.8	11.4
3*	Colima, Col.	103° 43'	19° 14'	494	2,005.4	500	67	32.4	24.6	18.6
4*	Durango, Dgo.	104° 40'	24° 02'	1,889	2,174.7	495	49	24.4	17.8	10.6
5*	Guanajuato, Gto.	101° 15'	21° 01'	2,050	2,242.7	485	49	24.2	17.8	11.7
6	León, Gto.	101° 41'	21° 07'	1,885	2,797.4	485	58	27.2	19.5	11.7
7*	Chilpancingo, Gro.	99° 33'	17° 33'	1,360	1,556.9	510	77	28.9	21.4	15.5
8*	Guadalajara, Jal.	103° 23'	20° 40'	1,589	2,055.0	498	56	26.5	19.2	11.6
9*	Chapingo, Edo. de Méx.	98° 54'	19° 29'	2,250	1,739.5	475	65	24.6	14.8	5.7
10*	Puebla, Pue.	98° 12'	19° 02'	2,162	1,724.1	450	57	23.5	16.8	10.3
11*	Culiacán, Sin.	107° 24'	24° 49'	84	2,129.2	500	68	32.9	25.1	18.2
12*	Jalapa, Ver.	96° 55'	19° 32'	1,427	1,276.1	410	78	23.0	18.0	14.1
13*	Mérida, Yuc.	89° 30'	20° 59'	9	2,070.9	500	72	30.9	25.9	20.6
14*	Montecillo, Edo. de Méx.	98° 54'	19° 29'	2,250	1,804.2	475	63	23.3	14.6	5.7
15*	Esc. Agronomía, S.L.P.	101° 02'	22° 14'	1,890	2,266.4	475	62	29.9	17.2	9.7
16	La Paz, B.C.S.	110° 25'	24° 10'	10	2,113.3	540	62	30.0	23.9	17.5
17	Ciudad Lerdo, Dgo.	103° 31'	25° 32'	1,135	2,173.3	500	43	28.7	21.2	12.6
18	Huejúcar, Jal.	103° 12'	22° 21'	1,932	2,123.2	500	56	26.1	17.4	8.8

* observatorios utilizados.

§ del mapa número 34 de Hernández et al. (1991).

radiación solar, humedad relativa y temperaturas en las abscisas. Las nubes de puntos que definen los 18 puntos, uno para cada observatorio, conducen a visualizar que las estaciones León, Guanajuato, Chilpancingo, Guerrero, y Jalapa, Veracruz, constituyen valores dispersos, el primero por registrar una evaporación en exceso y los otros dos por defecto. Lo anterior se muestra con la ilustración 1 de evaporación contra humedad relativa.

Después de una revisión detallada de los datos mensuales de los observatorios citados, únicamente se consideró conveniente eliminar el de León. Por lo anterior, la información climatológica empleada corresponde a 14 observatorios meteorológicos, los señalados con un asterisco en el cuadro 1. Los observatorios de La Paz, Baja California Sur, Ciudad Lerdo, Durango, y Huejucar, Jalisco, no fueron incluidos por carecer de datos de horas totales de insolación (n), lo cual no permite estimar la radiación solar incidente (R_i) a través de la fórmula de Angström (apéndice 1).

Revisión de relaciones causa-efecto

Planteamiento de regresión lineal

En la búsqueda de cuáles deberían ser los elementos climáticos que incluyera la fórmula empírica que se intentaba desarrollar para estimar la evaporación mensual en el tanque tipo A, se procedió de lo más

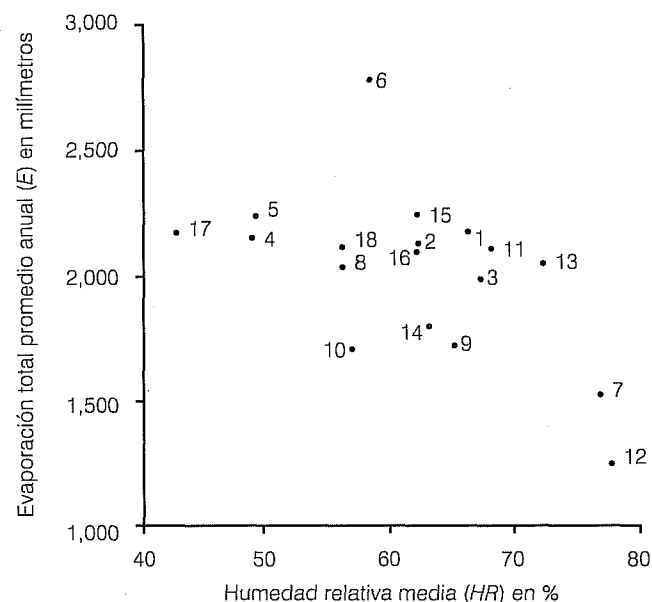
elemental a lo más general, por ello primero se probaron regresiones lineales entre la evaporación promedio mensual (E) y la radiación solar incidente (R_i) en langleys/día (ly/d) y en mm/d, y posteriormente con la radiación neta (R_n). La estimación de R_i y R_n se propuso realizar con base en los datos de insolación total (n), de acuerdo con las ecuaciones expuestas en el apéndice 1.

La capacidad predictiva de este primer modelo resultó más baja de lo esperado, medido esto a través del error estándar medio (EE), definido como (Kite, 1977):

$$EE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{nd} (E_{obs} - E_{est})^2}{(nd - np)}} \quad (1)$$

en donde E_{obs} y E_{est} son las evaporaciones observadas y estimadas, nd es el número de datos, igual a 168 (14 observatorios por 12 meses) y np es el número de parámetros de ajuste, en este caso dos, la ordenada al origen y la pendiente. Para comprobar numéricamente lo anterior se procedió a obtener esta misma relación con elementos climáticos de menor causa-efecto, como son la humedad relativa, las temperaturas máxima (T) y media (T_t), y la precipitación (P); los resultados obtenidos se han concentrado en el cuadro 2.

Ilustración 1. Diagrama de dispersión de los datos del cuadro 1 que se indican.



Cuadro 2. Resultados de los modelos de regresión indicados.

Relación	r_{xy}	EE (mm)
$E=f(R_i, \text{ly/d})$	0.7304	33.3
$E=f(R_i, \text{mm/d})$	0.7373	32.9
$E=f(HR, \%)$	-0.5423	40.9
$E=f(T, ^\circ\text{C})$	0.5982	39.0
$E=f(T_t, ^\circ\text{C})$	0.4820	42.7
$E=f(P, \text{mm})$	-0.2100	47.6
$E=f(R_E, \text{ly/d})$	0.5405	41.0
$E=f(R_i, HR)$	0.7809	30.5
$E=f(R_i, T)$	0.7942	29.7
$E=f(R_i, T_t)$	0.7736	31.0
$E=f(T, P)$	0.6619	36.6
$E=f(R_i, HR, T)$	0.8966	21.7
$E=f(R_i, T, P)$	0.8481	25.9
$E=f(R_i, HR, T, P)$	0.8971	21.7
$E=f(R_i, HR, T)_{\log}$	0.8946	22.5
$E=f(R_i, HR, T, P)_{\log}$	0.8948	22.6
$E=f(X, Y)_1$	0.7952	29.9
$E=f(X, Y)_2$	0.6634	36.9

r_{xy} = coeficiente de correlación lineal.

EE = error estándar medio.

Al observar que incluso la relación $E=f(Rn)$ resultaba deficiente o de escasa capacidad predictiva, y que la estimación de Rn requiere de información meteorológica específica como la humedad relativa (HR) y la insolación relativa (n/N), se planteó simplificar tal relación al utilizar la radiación solar extraterrestre (R_E), que es función únicamente de la latitud del lugar (Campos, 2002), según se expone en el apéndice 1. El resultado se muestra también en el cuadro 2.

Planteamiento de regresión múltiple

La siguiente etapa en la búsqueda de una fórmula empírica con mayor capacidad predictiva fue hacer uso de la regresión múltiple, según la ecuación 2, utilizando solamente dos variables independientes; posteriormente, se emplearon tres y cuatro variables con los resultados que se han concentrado en el cuadro 2. Finalmente se ajustó una regresión múltiple logarítmica con el tipo indicado por la ecuación 3.

$$E=a+b\cdot Ri+c\cdot HR+d\cdot T \quad (2)$$

$$E=\alpha\cdot Ri^{\beta}\cdot HR^{\gamma}\cdot T^{\delta}\cdot P^{\epsilon} \quad (3)$$

La parte final de esta etapa de uso del principio de mínimos cuadrados se concluyó con el ajuste de una ecuación de dos variables independientes del tipo general:

$$E=a+bX+cY+dXY+eX^2+fY^2 \quad (4)$$

Inicialmente se utilizó $X=Ri$ y $Y=HR$, y posteriormente $X=T$ y $Y=P$; sus resultados se presentan al final del cuadro 2.

Según se observa en el cuadro 2, el mejor ajuste corresponde a la ecuación 2, con los siguientes valores numéricos para sus constantes:

$$E=53.7366+0.1963\cdot Ri-2.0769\cdot HR+5.6527\cdot T \quad (5)$$

Planteamientos por optimización numérica

En la última etapa de esta búsqueda de la relación causa-efecto se intentó obtener la mejor fórmula empírica por medio de optimización numérica no restringida, haciendo uso del algoritmo de Rosenbrock (Rosenbrock, 1960; Kuester y Mize, 1973; Campos, 2003), inicialmente con una ecuación del tipo de la propuesta por Shuttleworth (1993), ésta es:

$$E=a\cdot Rn+b\cdot DEV \quad (6)$$

y finalmente con una fórmula más simple, al cambiar Rn por R_E , y a la vez más flexible, al tener dos parámetros más de ajuste, como la siguiente:

$$E=\alpha\cdot R_E^{\beta}+\gamma\cdot DEV^{\delta} \quad (7)$$

en las cuales DEV es el déficit de vapor igual a la diferencia entre la presión de vapor de saturación (e_s) y la presión actual (e). Las fórmulas utilizadas para estimar estos valores fueron las siguientes (UC, 1984):

$$e_s=6.108 \exp[(17.27\cdot Tt)/(Tt+237.3)] \quad (8)$$

$$e=e_s(HR/100) \quad (9)$$

En la tabulación siguiente se muestran únicamente tres de los diversos tanteos realizados con el algoritmo de optimización numérica no restringida, que utilizó como función objetivo (FO) el error estándar medio (ecuación 1), con $nd=168$, $np=4$ y tolerancia de error en la FO de 10^{-5} .

Para el segundo tanteo se disminuyó la tolerancia a 10^{-6} y se alcanzó una $FO=24.067$ con los resultados siguientes, los cuales definen la versión numérica de la ecuación 7, ésta es:

$$E=3.0346\cdot R_E^{0.4225}+16.6316\cdot DEV^{0.9099} \quad (10)$$

Parámetros iniciales				$FO_{inicial}$	Parámetros finales				FO_{final}	E1 y E2
α	β	γ	δ		α	β	γ	δ		
5.0	0.25	15.0	1.00	28.643	7.5328	0.2972	14.5644	0.9548	24.355	9-135
7.5	0.30	15.0	0.95	24.555	7.3969	0.2966	14.9590	0.9473	24.366	3-42
10.0	0.25	15.0	1.00	28.845	10.0529	0.2485	14.6826	0.9603	24.509	4-38

E1 = número de etapas.

E2 = número de evaluaciones de la FO .

Al comparar el error estándar medio de la ecuación 10 con los mejores resultados del cuadro 2, se observa que éste no alcanza los valores mínimos de las últimas fórmulas empíricas, pero tiene como ventaja fundamental el utilizar menos información climática. Además se realizaron otros ajustes, eliminando los observatorios de Chilpancingo y Jalapa, e incorporando los de La Paz, Ciudad Lerdo y Huejúcar, pero tales análisis no condujeron a mejores resultados.

Relación humedad relativa-temperatura

Una simplificación importante en los cálculos se logró cuando se sustituyó la radiación solar incidente por la radiación solar extraterrestre y quizás otra más trascendente se obtenga al evitar el uso de la humedad relativa, dada su escasez de registro, ya que únicamente está disponible en los observatorios meteorológicos; 54 en total en la república mexicana (SMN, 1982; Campos, 2002).

Con anterioridad se ha aceptado (Papadakis, 1980) que existe una relación entre las temperaturas mínima promedio (t) y de punto de rocío (t_*); tal relación ha sido comprobada para la zona centro-noreste de la república mexicana (Campos, 1992) y ahora inicialmente se ha revisado para los 15 observatorios meteorológicos utilizados, concluyéndose que tal relación existe. Por ejemplo, empleando una simple regresión lineal, los resultados obtenidos fueron:

$$t_* = b + m \cdot t = 0.116 + 0.9497 \cdot t \quad (11)$$

$$\text{con } nd=180 \quad r_{xy}=0.9173 \quad EE=2.292^\circ\text{C}$$

Con el propósito de mejorar la estimación de t_* , se buscó, por medio de optimización numérica no restringida, una relación del tipo:

$$t_* = \alpha(t + \beta)^{\gamma} \quad (12)$$

empleando nuevamente el algoritmo de Rosenbrock y como función objetivo (FO) el error estándar medio (ecuación 1), con $np=3$. Al utilizar como valores iniciales de los parámetros de ajuste los siguientes: $\alpha=0.50$, $\beta=1.00$ y $\gamma=1.25$, se obtuvieron los resultados que se detallan a continuación en el cuadro:

Los resultados anteriores demuestran que para mejorar el ajuste se deben suprimir observatorios (datos) y ello resta universalidad a la ecuación empírica encontrada. Por lo anterior, se revisó la relación t_* - t , primeramente en los 54 observatorios (nob) y después para los 23 que tienen altitud menor de 600 msnm, y los 31 restantes. Los resultados fueron:

<i>nob</i>	<i>nd</i>	<i>b</i>	<i>m</i>	r_{xy}	<i>EE</i> (°C)
54	648	-0.2590	0.9762	0.9042	2.726
31	372	-0.4807	0.9798	0.7915	2.956
23	276	1.6830	0.8873	0.8794	2.329

Estas regresiones y otras mejoradas al suprimir observatorios que mostraban los valores más dispersos, demostraron que cada ecuación conduce a estimaciones más aproximadas en unos observatorios, pero en otros se vuelve más dispersa. Los análisis realizados condujeron a aceptar como relación válida $t_* = t$, es decir que la temperatura promedio mínima (t) es una estimación aceptable de la temperatura de punto de rocío (t_*). Ahora, conociendo a t_* , la humedad relativa está definida por medio de las expresiones (UC, 1984):

$$B = \frac{t_*}{237.3 + t_*} \quad (13)$$

$$e = 6.108 \cdot \exp(17.27 \cdot B) \quad (14)$$

$$HR = \frac{e}{e_s} \cdot 100 \quad (9)$$

Aplicación de fórmulas

Validación y correcciones

La validación de la ecuación 10 se realizó bajo dos enfoques de aplicación: el primero empleando las

Observatorios y (<i>nd</i>)	<i>FO</i> _{inicial}	<i>FO</i> _{final}	<i>E1</i> y <i>E2</i>	α	β	γ
Todos (180)	2.927	2.248	8-95	0.5507	1.0797	1.1693
Sin Durango (168)	2.782	2.096	16-141	0.6992	1.0515	1.0914
Sin Durango y Guanajuato (156)	2.423	1.867	3-22	0.4702	1.0033	1.2447
Sin Durango, Guanajuato y Chapingo (144)	2.390	1.551	13-99	0.6842	1.0776	1.1026

E1 = número de etapas.

E2 = número de evaluaciones de la FO.

ecuaciones 8 y 9 para calcular el déficit de vapor en los 14 observatorios meteorológicos que se utilizaron para su deducción. A los resultados de la ecuación 10 se les restó la evaporación observada y tales diferencias se presentan en el cuadro 3, así como sus correspondientes valores anuales. El segundo enfoque de aplicación de la ecuación 10 utiliza la relación $t_a = t$, y las ecuaciones 13 y 14 para estimar el déficit de vapor, y sus resultados se han concentrado en el cuadro 4.

En los cuadros 3 y 4 se han calculado las diferencias mensuales promedio y mediana, y se indican con signo contrario como correcciones propuestas para la ecuación 10, según si se determina el déficit de vapor con datos

de humedad relativa (HR), o con base en la temperatura promedio de mínimas (t), por carecer de tales mediciones psicométricas.

Contraste en cincuenta estaciones climatológicas

En el cuaderno de *Normales climatológicas* (SMN, 1982) se tienen únicamente 274 estaciones que cuentan con registros promedio mensuales de temperaturas media y mínima, y de evaporación. De tal disponibilidad se seleccionaron cincuenta a partir del siguiente criterio: se propuso considerar una o dos estaciones por estado, preferentemente de ciudades importantes; en caso de

Cuadro 3. Diferencias mensuales (mm) y valores anuales entre la evaporación estimada con base en la ecuación 10 y los datos de humedad relativa y la registrada en los observatorios meteorológicos indicados.

Número de estación	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.	Ev. est.	Ev. obs.	Dif.
1 Piedras Negras, Coah.	-1.3	24.7	-10.1	-2.9	-24.3	5.2	-45.8	-23.1	-3.0	-16.2	29.1	25.7	2,152.7	2,194.7	-42.0
2 Saltillo, Coah.	2.1	-3.8	-40.6	-35.5	-53.1	-44.6	-38.1	-43.5	-19.0	-5.4	14.7	12.4	1,894.7	2,149.2	-254.5
3 Colima, Col.	22.7	25.5	27.2	55.9	21.2	7.8	6.1	8.0	10.0	13.3	14.2	26.1	2,243.5	2,005.4	238.1
4 Durango, Dgo.	-19.0	-17.9	-38.8	-5.2	0.3	57.3	49.6	42.2	48.5	2.8	-4.6	4.1	2,294.2	2,174.7	119.5
5 Guanajuato, Gto.	24.1	25.1	-0.2	-0.7	-4.6	-10.7	-6.8	-5.9	-7.5	-3.3	17.2	26.8	2,296.2	2,242.7	53.5
7 Chilpancingo, Gro.	4.0	5.4	-18.9	-13.1	0.0	3.9	10.3	9.4	7.6	-8.0	11.3	17.8	1,586.9	1,556.9	30.0
8 Guadalajara, Jal.	29.9	23.9	-7.2	5.4	-4.9	-6.0	-6.6	-1.0	14.0	22.6	37.6	42.8	2,205.6	2,055.0	150.6
9 Chapingo, Edo. de Méx.	1.5	-3.4	-22.2	-11.8	-31.8	-14.0	-11.0	-13.6	-12.8	-14.2	-3.5	2.8	1,605.5	1,739.5	-134.0
10 Puebla, Pue.	15.3	18.4	-11.2	5.6	12.8	34.8	24.9	28.3	35.1	19.5	28.0	22.9	1,958.6	1,724.1	234.5
11 Culiacán, Sin.	24.8	28.4	-6.3	-1.4	-12.4	1.6	2.2	-0.7	9.3	12.3	32.2	28.0	2,247.4	2,129.2	118.2
12 Jalapa, Ver.	13.4	22.0	10.4	5.6	4.0	-2.4	7.0	2.0	14.3	8.5	17.9	19.8	1,398.6	1,276.1	122.5
13 Mérida, Yuc.	9.2	26.3	9.1	15.8	-2.8	0.2	-12.5	-10.8	-1.3	-2.4	5.9	9.6	2,117.2	2,070.9	46.3
14 Montecillo, Edo. de Méx.	-11.0	-31.2	-70.0	-62.8	-26.5	-5.7	10.9	8.7	18.5	5.4	9.2	3.5	1,653.1	1,804.2	-151.1
15 Esc. de Agronomía, S.L.P.	-7.3	-21.9	-42.8	-40.4	-61.5	-49.3	-50.3	-82.4	-36.5	-26.1	3.6	4.2	1,855.8	2,266.4	-410.6
- Corrección algebraica promedio	-7.7	-8.7	15.8	6.1	13.1	1.6	4.3	5.9	-5.5	-0.6	-15.2	-17.6	-	-	-
- Corrección mediana	-6.6	-20.2	10.7	2.2	4.8	1.1	2.2	0.9	-8.5	-0.2	-14.5	-18.8	-	-	-

Cuadro 4. Diferencias mensuales (mm) y valores anuales entre la evaporación estimada con base en la ecuación 10 y la temperatura promedio de mínimas y la registrada en los observatorios meteorológicos indicados.

Número de estación	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.	Ev. est.	Ev. obs.	Dif.
1 Piedras Negras, Coah.	4.8	24.2	-24.2	-44.0	-41.4	-32.8	-87.8	-58.2	-16.1	-13.3	38.3	38.0	1,982.2	2,194.7	-212.5
2 Saltillo, Coah.	-2.1	-12.7	-61.1	-64.9	-75.9	-63.7	-49.9	-46.2	-16.2	-2.2	11.8	5.9	1,772.0	2,149.2	-377.2
3 Colima, Col.	15.1	13.4	12.1	22.9	-18.2	-10.9	7.3	13.5	12.1	18.3	20.3	23.2	2,134.7	2,005.4	129.3
4 Durango, Dgo.	-41.6	-51.3	-87.5	-64.5	-62.3	7.4	17.3	12.9	25.1	-9.9	-30.7	-16.1	1,873.5	2,174.7	-301.2
5 Guanajuato, Gto.	-13.3	-27.6	-70.5	-79.1	-74.8	-53.6	-42.3	-40.3	-41.2	-38.1	-15.4	-8.7	1,737.9	2,242.7	-504.8
7 Chilpancingo, Gro.	36.4	36.0	7.1	4.6	18.8	24.2	38.6	37.7	39.5	22.6	42.4	45.7	1,910.5	1,055.0	-37.8
8 Guadalajara, Jal.	19.5	1.7	-38.3	-43.3	-53.0	-26.3	-10.0	4.6	14.1	23.9	35.4	33.7	2,017.2	2,055.0	-37.8
9 Chapingo, Edo. de Méx.	22.2	12.2	-10.3	0.3	-12.8	6.7	17.1	16.8	15.3	18.4	26.9	28.7	1,881.1	1,739.5	141.6
10 Puebla, Pue.	0.2	-7.9	-60.5	-45.8	-19.2	15.5	13.2	21.2	31.4	16.3	20.0	13.8	1,722.4	1,724.1	-1.7
11 Culiacán, Sin.	48.6	43.1	3.0	-5.1	-29.3	-33.3	1.7	23.8	29.4	32.8	50.8	50.0	2,344.7	2,129.2	215.5
12 Jalapa, Ver.	18.0	24.2	6.6	-1.5	1.4	4.5	12.4	4.4	21.2	14.1	15.9	19.7	1,417.1	1,276.1	141.0
13 Mérida, Yuc.	10.8	21.1	-5.2	-1.8	-18.2	-3.7	-6.5	-4.9	10.1	2.9	7.4	13.1	2,096.0	2,070.9	25.1
14 Montecillo, Edo. de Méx.	4.2	-16.0	-55.3	-35.1	-7.3	2.5	16.8	20.8	29.2	24.4	-32.9	23.7	1,845.0	1,804.2	40.8
15 Esc. de Agronomía, S.L.P.	1.8	-9.0	-41.4	-40.7	-64.5	-61.8	-57.2	-99.5	-39.1	-20.0	17.2	13.4	1,865.6	2,266.4	-400.8
- Corrección algebraica promedio	-8.9	-3.7	30.4	28.4	32.6	16.1	9.2	6.7	-8.2	-6.4	-19.5	-20.3	-	-	-
- Corrección mediana	-7.8	-7.0	31.3	37.9	24.3	7.3	-4.5	-8.8	-14.7	-15.2	-20.2	-21.5	-	-	-

existir varias, se seleccionarán las de mayor número de años de registro y altitud. El primer planteamiento intenta abarcar la mayoría de las regiones geográficas o climas del país, y el último es conveniente por confiabilidad y debido a que la información disponible (cuadro 1) para

obtener la ecuación 10 no abarcó observatorios meteorológicos en las zonas costeras, con excepción de Mérida, Yucatán.

En el cuadro 5 se han concentrado parte de los resultados de las cincuenta estaciones procesadas,

Cuadro 5. Resultados del contraste de las ecuaciones 10 y 16 en cincuenta estaciones climatológicas de la república mexicana (SMN, 1982).

Número de estación	Latitud (°)	Eobs (mm)	Eest (mm)	Diferencias			Eest anual	Dif.
				anual	positiva	negativa		
1 Pabellón, Ags.	22.18333	2191.7	2033.8	-157.9	8.2	-39.0	2021.2	-170.5
2 Presa Rodríguez, B.C.N.	32.43333	1826.7	1673.1	-153.6	30.9	-66.0	1728.5	-98.2
3 Mexicali, B.C.N.	32.66667	2212.7	2556.1	343.4	56.9	-12.2	2226.8	14.1
4 Todos Santos, B.C.S.	23.45000	1701.0	1848.4	147.4	56.0	-19.4	1903.2	202.2
5 Cd. del Carmen, Camp.	18.65000	1499.0	2031.7	532.7	66.4	-	2019.1	520.1
6 Champotón, Camp.	19.38333	1707.3	2162.0	454.7	66.2	-	2110.1	402.8
7 Presa V. Carranza, Coah.	27.53333	2445.7	2240.2	-205.5	21.0	-91.9	2074.6	-371.1
8 Villa Juárez, Coah.	27.60000	2248.1	2295.4	47.3	44.1	-59.7	2111.2	-136.9
9 Callejones, Col.	18.81667	1756.0	2376.6	620.6	75.7	-	2286.4	530.4
10 La Concordia, Chis.	16.08333	1834.5	2319.2	484.7	60.3	-	2253.6	419.1
11 Villa Flores, Chis.	16.23333	1766.2	2374.7	608.5	67.6	-5.2	2285.3	519.1
12 Camargo, Chih.	27.70000	2386.2	2396.1	9.9	29.9	-36.3	2194.7	-191.5
13 Cd. Delicias, Chih.	28.20000	2419.2	2129.8	-289.4	9.2	-65.1	2023.1	-396.1
14 Creel, Chih.	27.75000	1424.7	1633.4	208.7	35.5	-16.3	1741.0	316.3
15 Ixtacalco, D.F.	19.38333	1470.6	1963.5	492.9	85.6	-	1990.1	519.5
16 El Cantil, Dgo.	24.90000	1403.9	1436.9	33.0	16.4	-15.3	1661.9	258.0
17 Yuriria, Gto.	20.23333	1984.8	2015.3	30.5	19.3	-19.2	2013.8	29.0
18 Ixtapilla, Gro.	18.53333	2596.8	2644.3	41.5	41.7	-71.7	2488.8	-108.0
19 Ixmiquilpan, Hgo.	20.48333	1628.1	2198.9	570.8	82.1	-	2145.7	517.6
20 Tula de Allende, Hgo.	20.05000	1919.9	2114.4	194.5	43.9	-13.9	2074.8	154.9
21 Colotlán, Jal.	22.11667	2342.5	2443.2	100.7	20.1	-7.3	2293.4	-49.1
22 Chapala, Jal.	20.30000	1751.4	1717.5	-33.9	25.9	-27.4	1840.2	88.8
23 Almoloya, Edo. de Méx.	19.15000	1593.8	1638.9	45.1	15.6	-2.7	1806.3	212.5
24 Cuitzeo, Mich.	19.96667	1822.6	2007.0	184.4	45.2	-1.0	2003.7	181.1
25 Cuernavaca, Mor.	18.91667	2259.4	1901.3	-358.1	-	-44.7	1952.4	-307.0
26 Jumatán, Nay.	21.56667	1517.3	2015.2	497.9	57.8	-	2003.5	486.2
27 El Cuchillo, N.L.	25.73333	2618.0	2206.8	-411.2	5.8	-119.4	2075.4	-542.6
28 Topo Chico, N.L.	25.80000	2207.4	2071.1	-136.3	10.2	-59.1	1997.3	-210.1
29 Sta. Ma. Ecatepec, Oax.	16.28333	1381.9	1507.7	125.8	37.2	-13.7	1752.5	370.6
30 Papaloapan, Oax.	18.15000	1926.2	1984.6	58.4	41.5	-30.7	2005.0	78.8
31 Tepelmeme de M., Oax.	17.86667	1621.8	1811.1	189.3	38.7	-2.6	1906.8	285.0
32 Villa Corregidora, Gro.	20.53333	2107.4	2097.7	-9.7	16.5	-17.8	2063.7	-43.7
33 Felipe Carrillo P., Q.R.	19.58333	1442.2	2253.4	811.2	90.0	-	-2178.8	726.6
34 Matehuala, S.L.P.	23.65000	2195.7	2054.2	-141.5	2.3	-44.2	2007.0	-188.7
35 Villa de Arriaga, S.L.P.	21.91667	1934.6	1773.6	-161.0	5.6	-34.5	1852.4	-82.2
36 El Fuerte, Sin.	26.33333	2324.6	2810.5	485.9	71.2	-20.5	2594.1	269.5
37 Guamúchil, Sin.	25.46667	2423.8	2555.0	131.2	52.7	-63.0	2404.2	-19.6
38 El Orégano, Son.	29.23333	2418.2	2997.2	579.0	87.2	-8.2	2704.8	286.6
39 S.L. Río Colorado, Son.	32.48333	2518.9	2500.6	-18.3	35.9	-78.4	2193.4	-325.5
40 Tenosique, Tab.	17.48333	1446.7	2240.0	793.3	94.4	-	2161.7	715.0
41 Villahermosa, Tab.	17.98333	1504.3	2404.2	899.9	106.2	-	2278.2	773.9
42 Cd. Victoria, Tam.	23.75000	1835.9	2235.9	400.0	82.5	-28.4	2129.5	293.6
43 Reynosa, Tam.	26.10000	1840.3	2059.2	218.9	54.3	-37.9	1977.5	137.2
44 Tlaxco, Tlax.	19.63333	1744.7	1804.4	59.7	15.2	-11.1	1891.3	146.6
45 Heroica Alvarado, Ver.	18.76667	1626.7	1821.9	195.2	52.3	-36.1	1895.4	268.7
46 Cosamaloapan, Ver.	18.36667	1741.4	1954.6	213.2	42.9	-6.9	1980.1	238.7
47 Ingenio Catmis, Yuc.	19.91667	1980.8	2364.6	383.8	53.5	-	2255.4	274.6
48 Telchac Puerto, Yuc.	21.33333	1790.8	1929.6	138.8	52.9	-12.3	1946.8	156.0
49 El Sauz, Zac.	23.18333	2098.6	1977.4	-121.2	15.4	-37.5	1967.7	-130.9
50 Zacatecas, Zac.	22.78333	2233.4	1785.9	-447.5	-	-71.7	1863.3	-370.1

indicando sus evaporaciones anuales estimadas y observada, así como las diferencias entre ambas y las máximas mensuales. Posteriormente, en el cuadro 6 se presentan las diferencias mensuales en sólo diez estaciones seleccionadas del cuadro 5, cinco con las peores estimaciones obtenidas y cinco con las mejores o más aproximadas. Todas las estimaciones citadas se realizaron por medio de la ecuación 10, empleando como temperatura de punto de rocío (t_r) la mínima (t) y aplicando la corrección mediana deducida en el cuadro 4.

Contraste anual

Con base en los datos del cuadro 1, con excepción del observatorio de León, Guanajuato, se aplicó el algoritmo de Rosenbrock para deducir una ecuación empírica, a fin de estimar la evaporación media anual en tanque tipo A, utilizando la humedad relativa para cuantificar el déficit de vapor (DEV) o la temperatura mínima, como temperatura de punto de rocío. Las fórmulas obtenidas con cada enfoque, incluyendo sus correcciones medianas deducidas de después de su validación, son las siguientes:

$$E = 18.1743 \cdot R_E^{0.6586} + 24.8376 \cdot DEV^{1.3786} + 4.2 \quad (15)$$

$$E = 12.4334 \cdot R_E^{0.7159} + 20.1460 \cdot DEV^{1.5285} - 16.0 \quad (16)$$

En el cuadro 5, en sus dos últimas columnas se incluyen los resultados de la ecuación 16 y su diferencia con el valor observado de evaporación media anual.

Conclusiones

La disponibilidad publicada de registros promedio mensuales simultáneos de evaporación en tanque tipo

A y de humedad relativa es realmente escasa en la república mexicana, pues de acuerdo con el cuaderno de *Normales climatológicas* (SMN, 1982), únicamente se tienen 16 observatorios meteorológicos con tal información y éstos presentan una mala distribución espacial, dejando la zona sur del país sin datos; además, la mayoría se ubica en altitudes superiores a los 1,000 msnm (ver cuadro 1).

Lo anterior limita notoriamente la universalidad de una fórmula empírica deducida con base en tal información climatológica. Aunado a tal inconveniente, se tiene el hecho de que la evaporación en general no depende solamente de las condiciones de humedad atmosférica y de la radiación solar, sino también del viento y de las condiciones de exposición del tanque evaporador tipo clase A.

Las observaciones anteriores justifican la reducida exactitud de la fórmula empírica establecida (ecuación 10), medida a través del error estándar medio (ecuación 1), que resultó del orden de 24 mm, pero que en realidad presenta valores máximos de hasta -119 mm en El Cuchillo, Nuevo León, y de 106 mm en Felipe Carrillo Puerto, Quintana Roo.

En contraparte, la fórmula empírica propuesta tiene como ventajas fundamentales requerir únicamente dos datos climáticos para su aplicación: las temperaturas media y mínima, y la latitud del lugar. Además, como se demostró en su contraste anual (cuadro 5), sus estimaciones son bastante aproximadas o similares, permitiendo en las localidades con ausencia de datos climáticos, obtener una idea del valor medio anual de la evaporación en tanque tipo A por medio de estimaciones de las temperaturas media y mínima realizadas, por ejemplo, con base en curvas isotermas, construidas con la información regional disponible.

Cuadro 6. Diferencias mensales y anual entre la evaporación estimada con la ecuación diez y las observadas en diez estaciones climatológicas de la república mexicana (SMN, 1982).

Número de estación	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.	Anual
1 Presa V. Carranza, Coah.	12.8	21.0	15.9	12.0	-32.9	-60.7	-91.9	-77.2	-24.7	-1.8	8.8	13.1	-205.5
2 Villa Flores, Chis.	67.4	-5.2	45.2	64.2	63.2	67.6	46.6	42.2	52.4	45.9	61.7	57.3	608.5
3 El Cuchillo, N.L.	5.8	-1.9	-0.9	-10.3	-48.5	-78.2	-119.4	-94.4	-43.6	-14.1	-4.7	-1.1	-411.2
4 Felipe Carrillo Puerto, Q.R.	76.8	78.8	90.0	88.7	64.1	53.2	42.0	56.0	62.4	65.1	70.4	63.7	811.2
5 Villahermosa, Tab.	74.9	82.9	106.2	93.2	87.0	74.0	56.1	60.8	68.5	67.0	63.2	66.0	899.9
6 El Cantil, Dgo.	9.6	3.3	16.4	11.4	5.4	16.7	13.9	-11.7	-6.4	-4.0	-6.3	-15.3	33.0
7 Yuriria, Gto.	18.4	16.9	9.4	15.7	-10.7	-19.0	-9.8	-19.2	-10.8	2.6	17.6	19.3	30.5
8 Almoloya, Edo. de Méx.	5.8	-3.3	0.9	15.6	3.2	7.1	3.5	-2.3	-2.7	5.7	5.2	6.4	45.1
9 Villa Corregidora, Qro.	16.5	15.1	3.0	4.4	-16.8	-14.8	-17.8	-6.9	-10.6	4.5	3.0	10.8	-9.7
10 Tlaxco, Tlax.	-11.1	8.1	1.7	5.3	14.1	-8.4	11.0	15.2	13.9	-0.5	3.3	7.2	59.7

Apéndice: estimación de la radiación solar

Definiciones y simbología

Radiación

Energía en tránsito (energía radiante) emitida por la fuente que irradia, en este caso el sol, en todas direcciones y con unidades de joules, calorías o watt-hora.

Irradiación (R)

Energía que en forma de radiación se integra o totaliza durante un cierto tiempo en una superficie o zona; sus unidades más usuales son joules/m², cal/cm² (llamado langley: ly) o kwatt-hora/m². Es frecuente anexar a las unidades de la irradiación el lapso durante el cual ésta se totalizó, por ejemplo ly/día.

Soleamiento (n)

Es el tiempo con disponibilidad de sol directo (Hernández *et al.*, 1991). Se denomina soleamiento o insolación efectiva al cociente entre la duración del soleamiento real (n) y el máximo teórico posible (N), o duración astronómica del soleamiento. La irradiación solar se puede descomponer en directa y difusa. La directa proviene linealmente del sol (R_i) y la difusa (R_f) de otras direcciones debido a la reflexión y dispersión que producen en la radiación solar, la atmósfera y las nubes.

Estimación de la insolación

La insolación (n) se obtiene con base en las lecturas diarias del heliógrafo Campbell-Stokes; en cambio, N está disponible por ejemplo en las tablas meteorológicas Smithsonianas (Kijne, 1978); ambos valores se expresan en valores mensuales promedio, en horas. Para evitar la interpolación de los valores de N en la citada tabla, se planteó originalmente representar los valores de N a través de una fórmula empírica senoidal (Campos, 1989). Posteriormente, mediante optimización no restringida, con base en el algoritmo de Rosenbrock (Kuester y Mize, 1973; Campos, 2003), tal ajuste fue verificado y corregido, proponiéndose finalmente:

$$N = A + B[\sin(30 \cdot nm + 83.5)] \quad (A.1)$$

en la cual nm es el número del mes, uno para enero y doce para diciembre; A y B son constantes función de la latitud del lugar (LAT) en grados, con las expresiones siguientes cuando ésta varía de 15° a 35° N, es decir, las

latitudes en que se ubica aproximadamente la república mexicana:

$$A = 12.09086 + 0.00266 \cdot LAT \quad B = 0.2194 - 0.06988 \cdot LAT$$

Estimación de la radiación solar extraterrestre (R_E)

La estimación de R_E media mensual o valor de Angot se puede realizar con base en ecuaciones que calculan la declinación del día (Gommes, 1983; Hargreaves y Samani, 1991), o bien interpolando en la tabulación correspondiente para la latitud del lugar (φ) en grados. Nuevamente con la idea de evitar la interpolación en la tabla respectiva, se desarrollaron, mediante el polinomio de interpolación de Newton de tercer grado (Chapra y Canale, 1999), 12 ecuaciones con la forma:

$$R_E = b_0 + b_1 \cdot (\varphi - 10) + b_2 \cdot (\varphi - 10)(\varphi - 20) + b_3 \cdot (\varphi - 10)(\varphi - 20)(\varphi - 30) \quad (A.2)$$

y los coeficientes b_i dados en la tabulación siguiente (Campos, 2002):

Mes	b_0	b_1	b_2	b_3	Mes	b_0	b_1	b_2	b_3
Ene.	760	-12	-0.075	1/600	Jul.	880	5	-0.100	-1/1,200
Feb.	820	-9	-0.100	1/1,200	Ago.	890	2	-0.125	-1/1,200
Mar.	875	-5	-0.125	1/1,200	Sep.	880	-2.5	-0.150	1/1,200
Abr.	895	0	-0.125	-1/1,200	Oct.	840	-8	-0.075	-1/1,200
May.	890	4	-0.100	-1/400	Nov.	780	-11.5	-0.025	-1/300
Jun.	875	6	-0.100	-1/600	Dic.	740	-12.5	-0.075	1/1,200

Estimación de la radiación solar incidente (R_i)

Para la estimación de R_i o irradiación solar global media diaria en ly/día se tienen dos métodos de estimación: el primero se aplica cuando se dispone de datos de insolación (n) o soleamiento real, obtenidos en el heliógrafo Campbell-Stokes, y se realiza con base en la ecuación de Angström:

$$R_i = R_E \left(a + b \cdot \frac{n}{N} \right) \quad (A.3)$$

en la cual, los nuevos parámetros por definir son a y b , que son constantes empíricas con las expresiones siguientes que han sido propuestas para la república mexicana (Jáuregui, 1978):

$$a = 0.290 \cdot \cos \varphi \quad b = 0.550 \quad (A.4)$$

donde nuevamente φ es la latitud del lugar en grados. El segundo método de estimación de R_i consiste en leer sus valores mensuales en los mapas que han sido contruidos para la república mexicana, por Almanza y López (1978) y Hernández *et al.* (1991).

Estimación de la radiación solar neta (R_n)

De la radiación que llega a la superficie terrestre (suelos, rocas, vegetación, agua, etcétera), una parte se refleja debido a su *albedo* (r). Entonces la radiación reflejada (R_r) será:

$$R_r = r \cdot (R_i) \quad (A.5)$$

Un valor de 0.05 es el albedo medio para una superficie de agua libre. Por otra parte, la superficie terrestre (continentes y océanos) emite radiación, porque al recibir radiación incidente aumenta su temperatura y entonces irradia calor con diferente longitud de onda. En general, la superficie terrestre emite radiación de onda larga a la atmósfera, la cual es absorbida por el vapor de agua, las nubes y el dióxido de carbono de la atmósfera y una porción es reirradiada a la tierra como radiación atmosférica. Además, parte de la radiación de onda corta recibida en la atmósfera es absorbida por sus componentes citados y reirradiada a la tierra como radiación de onda larga. Ante la dificultad para realizar mediciones confiables de las componentes citadas, se ha optado por realizar estimaciones de la radiación neta de onda larga, por ejemplo a través de la ecuación debida a Brunt, la cual es función de la insolación relativa (n/N), ésta es (Dunne y Leopold, 1978):

$$R_{nl} = \sigma \cdot T_2^4 \left(0.56 - 0.08 \sqrt{e_2} \right) \left(0.10 + 0.90 \frac{n}{N} \right) \quad (A.6)$$

en la cual:

- R_{nl} = radiación neta de onda larga en ly/día.
- σ = constante de Stefan-Boltzmann, igual a $1.17 \cdot 10^{-7}$ ly/ $^{\circ}K^4$ /día.
- T_2 = temperatura del aire a una altura de dos metros, en $^{\circ}K$ ($^{\circ}K = ^{\circ}C + 273$).
- e_2 = presión del vapor del aire a dos metros de altura, en milibares (mb).

Finalmente, el balance de energía o radiación neta recibida (R_n) por un cuerpo o una superficie de albedo r , es la porción de la radiación solar incidente que no es reflejada ni reirradiada a la atmósfera, es decir:

$$R_n = R_i(1-r) - R_{nl} \quad (A.7)$$

Recibido: 02/09/2003

Aprobado: 19/11/2003

Referencias

- ALMANZA, R. y LÓPEZ, S. Radiación solar global en la república mexicana mediante datos de insolación. *Series del Instituto de Ingeniería*. Segunda edición. Núm. 357.I.I. México, D.F.: UNAM, 1978, 20 pp.
- BOUCHER, K. Hydrological monitoring and measurement methods. Chapter 4. *Contemporary hydrology: towards holistic environmental science*. Robert Wilby (editor). Londres: John Wiley & Sons, 1997, pp. 107-149.
- CAMPOS-ARANDA, D.F. Primera estimación del potencial agrícola del estado de San Luis Potosí por medio de índices climáticos. 2: Análisis de datos y resultados. *Memorias de la Segunda Reunión Nacional de Agroclimatología*. Chapingo, México: Universidad Autónoma Chapingo, abril de 1989, pp. 80-91.
- CAMPOS-ARANDA, D.F. Análisis agroclimático de la información meteorológica disponible en la escuela de Agronomía de la UASLP. *IV Congreso Nacional de Meteorología*, del 4 al 6 de octubre de 1989, Chihuahua, Chih., pp. 62-66.
- CAMPOS-ARANDA, D.F. Aplicación de la clasificación bioclimática de UNESCO-FAO en el estado de San Luis Potosí. *VIII Congreso Nacional de Ingeniería Sanitaria y Ambiental*. Capítulo VI: Impacto Ambiental. Cocoyoc, Morelos, del 23 al 25 de septiembre de 1992.
- CAMPOS-ARANDA, D.F. Estimación de la ETP en la república mexicana con base en el método de Penman (primera parte: Teoría y datos utilizados). *XVII Congreso Nacional de Hidráulica. Avances en Hidráulica*. Vol. 9, Monterrey, Nuevo León, del 18 al 22 de noviembre del 2002, pp. 377-382.
- CAMPOS-ARANDA, D.F. *Introducción a los métodos numéricos: software en Basic y aplicaciones en hidrología superficial*. Capítulo 9: Optimización numérica. San Luis Potosí, México: Librería Universitaria Potosina, 2003, pp. 172-211.
- CHAPRA, S.C. y CANALE, R.P. Interpolación. Capítulo 18. *Métodos numéricos para ingenieros*. Tercera edición. México, D. F.: McGraw-Hill Interamericana Editores. 1999, pp. 502-536.
- GOMMES, R.A. Angot's value and daylength, FAO Plant production and protection paper No. 45. Chapter 3, theme 3.1.1. *Pocket computers in agrometeorology*. Roma: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1983, pp. 31-32.
- HARGREAVES, G.H. y SAMANI, Z.A. Evapotranspiración de referencia. *Programación del riego (un manual bilingüe)*. Nuevo Mexico, EU: Edditts. Las Cruces, 1991, pp. 19-23.

- HERNÁNDEZ, E., TEJEDA, A. y REYES, S. Mapas de irradiación solar y descripción de sus características más relevantes. Capítulo 5. *Atlas solar de la república mexicana*. Textos Universitarios. Universidad de Colima y Universidad Veracruzana, 1991, pp. 45-116.
- JÁUREGUI, E. Una primera estimación de la distribución de la radiación global y neta en México. *Recursos hidráulicos*. Vol. VII, núm. 2, 1978, pp. 96-105.
- KIJNE, J.W. Tablas para calcular la evaporación y la evapotranspiración. Anejo I. *Principios y aplicaciones del drenaje* del Vol. III. Publicación número 16. Wageningen, Holanda: International Institute for Land Reclamation and Improvement (ILRI), 1978, pp. 109-122.
- KITE, G.W. Comparison of frequency distributions. Chapter 12. *Frequency and risk analyses in hydrology*. Fort Collins, EU: Water Resources Publication, 1977, pp. 156-168.
- KUESTER, J.L. y MIZE, J.H. Multivariable unconstrained methods. ROSEN algorithm. Chapter 9. *Optimization techniques with Fortran*. New York: McGraw-Hill Book Co., 1973, pp. 320-330.
- LINACRE, E.T. A simple formula for estimating evaporation rates in various climates, using temperature data alone. *Agricultural Meteorology*, Vol. 18, 1977, pp. 409-424.
- LÓPEZ, J., TIJERINA, L. y ACEVES, L.A. Determinación de la evapotranspiración potencial en el área de influencia de Montecillo, haciendo uso de variables climáticas. *Memorias de la Segunda Reunión Nacional de Agroclimatología*. Chapingo, México: Departamento de Irrigación de la Universidad Autónoma Chapingo, abril de 1989, pp. 345-354.
- PAPADAKIS, J. Influencia de las condiciones hídricas sobre las plantas. Capítulo 3. *El clima con especial referencia a los climas de América Latina, península ibérica, excolonias Ibéricas y sus potencialidades agropecuarias*. Buenos Aires: Editorial Albatros, 1980, pp. 33-40.
- ROSENBROCK, H.H. An automatic method of finding the greatest or least value of a function. *Computer journal*. Vol. 3, 1960, pp. 175-184.
- SMN. *Normales climatológicas. Periodo 1941-1970*. México, D.F.: Dirección General del Servicio Meteorológico Nacional de la SARH, 1982, 799 pp.
- SHUTTLEWORTH, W.J. Evaporation. Chapter 4. *Handbook of hydrology*. David R. Maidment (editor en jefe). New York: McGraw-Hill, Inc., 1993, pp. 4.1 a 4.53.
- UC. *Converting humidity expressions with computers and calculators*. Berkeley, EU: University of California, 1984, 24 pp.

Abstract

CAMPOS ARANDA, D.F. Estimation of monthly evaporation in a class-A pan in the Mexican Republic through temperature data. Hydraulic engineering in Mexico (in Spanish). Vol. XIX, no. 4, October-December, 2004, pp. 85-96.

Based on the 17 meteorological stations of the Mexican Republic that have monthly evaporation records (E) in class-A pans, an empirical formula of the type $E = \alpha \cdot R_E^{\beta} + \gamma \cdot DEV^{\epsilon} + Co$ was calculated through a non-restricted numerical optimization, where R_E is the extraterrestrial solar radiation, DEV is the vapor deficit and Co is a correction term obtained by a validation procedure. The proposed equation has a mean standard error of 24 mm/month. Later, a relation between monthly temperatures of dew point and minimal temperature was searched in order to avoid the use of relative humidity records, since they are very scarce; there are only 54 in the whole country. With this new approach, other corrections were deduced. The proposed empirical formula has an acceptable forecasting estimation in places with an altitude greater than 1,000 m.a.s.l., according to the test ran in 50 weather stations in the country. However, it is not recommended in coastal regions where observed evaporation is generally overestimated. An empirical formula for the estimation of annual mean evaporation in class-A pans is also proposed, using just the location latitude and the respective values of minimal and mean temperatures. This latter equation gives similar results than those of the monthly estimation formula previously derived.

Keywords: evaporation, empirical formula, numerical optimization.

Dirección del autor:

Dr. Daniel Francisco Campos-Aranda

Profesor jubilado de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí,
Genaro Codina # 240, 78280 San Luis Potosí, San Luis Potosí,
México,
teléfono: (444) 815 14 31.