

Nueva fórmula para la determinación de evapotranspiración en Chile¹

Juan Tosso T.²

INTRODUCCION

Para la planificación y diseño de sistemas de riego, es necesario conocer los Requerimientos o Tasas de Riego. El parámetro más importante que interviene en su determinación es el uso-consumo o evapotranspiración de los cultivos, razón por la cual, es fundamental obtener una adecuada fuente de información de estos valores.

El uso-consumo es un factor que considera el agua utilizada tanto por concepto de evaporación desde la superficie del suelo y de las hojas como aquella necesaria para la transpiración de los cultivos. Es un fenómeno similar, en muchos aspectos, a la evaporación. Se diferencia de esta última en que el uso-consumo depende de las características fisiológicas del cultivo, de la disponibilidad de agua en el suelo y del porcentaje del área cubierta por el vegetal. Este factor depende tanto del clima como del cultivo, y para la determinación de sus valores reales, se requiere de estaciones experimentales con equipos especiales. Por estas razones es muy difícil la obtención de dichos valores, para los distintos cultivos y zonas climáticas del país. Para obviar estos problemas, desde el año 1945 se han estado utilizando fórmulas empíricas basadas en la relación existente entre uso-consumo y clima. Blaney y Criddle (1945), desarrollaron una fórmula, la que ha sido ampliamente usada para estimar requerimientos de riego. Luego fueron apareciendo otras, como las de Thornthwaite (1948), Penman (1948), Papadakis (1965), Christiansen (1961), Hargreaves (1966), etc., todas ellas basadas en antecedentes climáticos. Sin embargo, existe consenso entre los investigadores en esta materia, que es difícil obtener una fórmula universal, debido a que no es posible considerar los efectos de advección que están actuando en las distintas

partes del mundo, además de que la forma en que se registra la información climática también varía (Tosso, 1972).

Es conocido el hecho de que la evaporación desde una superficie de agua es el mejor integrador de los factores climáticos. Basándose en este hecho, se han realizado investigaciones tendientes a observar la relación existente entre la evaporación y el uso-consumo. Pruitt (1960 a, b) utilizó distintos tamaños y tipos de estanques o bandejas de evaporación, concluyendo que las variaciones que se obtienen no son de importancia, aunque con la bandeja Clase A estándar del U.S.W.B. se obtienen las más altas correlaciones. Mostró, además, que para cultivos que cubrían completamente el terreno (pastos) obtenía una relación entre evapotranspiración (ET) a través de un lisímetro de 6,1 m de diámetro, y evaporación de bandeja Clase A (EB), ET/EB igual a 1,0. Jensen y Middleton (1965) encontraron una relación casi constante entre evaporación y uso-consumo o evapotranspiración. Brutsaert (1965) informó haber encontrado una mejor correlación entre ET y EB medidas, que entre ET y EB estimado a través de conocidas fórmulas empíricas. Esto último ha sido posteriormente ratificado por Christiansen (1968), Hargreaves (1966) y Pruitt (1966).

Otro aspecto importante a considerar es lo relativo al "uso-consumo o evapotranspiración potencial". Este término se refiere a aquella que se produce en cultivos bajos, que cubren totalmente la superficie del terreno (normalmente pastos), que están en adecuadas condiciones fitosanitarias, y cuya humedad del suelo es óptima. Conociendo la relación que existe entre la evapotranspiración de un cultivo cualquiera o evapotranspiración actual (ETa), y la evapotranspiración potencial (ETp) se obtiene el coeficiente K del cultivo, luego es posible estimar ETa de la relación $ETa = K \times ETp$. Pero como se dijo anteriormente, existe una alta correlación entre ETp y EB, luego es posible estimar directamente ETa, considerando ahora el valor de EB y el coeficiente K, quedando expresada la

¹Este trabajo es parte de la Tesis del Autor para optar al Título de M. S. en Ingeniería de Riego en la Esc. de Ingeniería de la Universidad del Estado de Utah, USA.

El autor desea expresar su reconocimiento por la colaboración en el desarrollo del presente trabajo al Dr. Jerald E. Christiansen, y a la Escuela de Ingeniería de la Universidad del Estado de Utah.

Recepción originales: 10 de septiembre de 1974.

²Ing. Agr., M. S., Programa de Riego, Estación Experimental La Platina, Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA), Casilla 5427, Santiago, Chile.

relación de la siguiente manera: $ETa = K \times EB$.

Consciente de la importancia de conocer los valores mensuales de evaporación de bandeja Clase A, para las distintas zonas climáticas del país como índices de evapotranspiración potencial, se programó el presente trabajo, cuyo objetivo es obtener una fórmula matemática basada en antecedentes climáticos, a través de la cual sea posible estimar evapotranspiración potencial. Al mismo tiempo se entregan los coeficientes K para diferentes cultivos, con el fin de estimar evapotranspiración actual.

SIMBOLOGIA Y DEFINICION DE TERMINOS.

- EB** "Evaporación de bandeja Clase A", es la cantidad de agua que se evapora desde una bandeja estándar del U.S. Weather Bureau. Estas bandejas han sido adoptadas por la Organización Meteorológica Mundial. Sus valores se expresan normalmente en mm por mes.
- ET** "Evapotranspiración" es la cantidad de agua utilizada para el crecimiento vegetativo de un cultivo en un área determinada, tanto en el proceso de transpiración del cultivo como aquella evaporada desde el suelo. Se expresa normalmente en mm por mes. Para los propósitos de este trabajo se considerará sinónimo con el término "uso-consumo". La diferencia entre ambos es que este último considera el agua utilizada en la formación de tejidos, que es alrededor de 1,0%.
- ETp** "Evapotranspiración potencial" se define como el uso-consumo o evapotranspiración desde un cultivo bajo, verde, de crecimiento vigoroso (generalmente pasto), que cubre completamente la superficie del suelo y que se encuentra en condiciones óptimas de humedad del suelo.
- ETb** "Evapotranspiración potencial estimada", es aquella que utiliza el EB como índice de ETp.
- ETa** "Evapotranspiración actual" es la evapotranspiración, ET, para un cultivo cualquiera. Se calcula o estima, normalmente, multiplicando un coeficiente del cultivo, K, por la evapotranspiración potencial o evapotranspiración de bandeja.
- K** "Coeficiente del cultivo" son valores estimados de la relación entre evapotranspiración actual, ETa, y valores computados de evapotranspiración potencial, (ETp o ETb), para diferentes estados de crecimiento vegetativo del cultivo (ETa/ETp o ETa/ETb).

MATERIALES Y METODOS

El primer paso en el presente estudio fue analizar la información climática y de bandeja Clase A existente en el país. Se seleccionaron 9 estaciones que proveían información de buena calidad y suficientes para las necesidades del estudio. Las siguientes fueron las estaciones seleccionadas: Serena (Latitud 29,9°S), Ovalle (Latitud 30,36°S), Santiago (Latitud 30,45°S), San Fernando (Latitud 34,58°S), Curicó (Latitud 34,98°S), Linares (Latitud 35,85°S), Chillán (Latitud 36,6°S), Los Angeles (Latitud 37,47°S), Temuco (Latitud 38,75°S). Dicha información se utilizó en forma de promedios mensuales. Todos los datos para un determinado mes y para una determinada estación meteorológica fueron traspasados a tarjetas de computación. Las fuentes de donde se obtuvo la información fueron: Oficina Meteorológica de la Fuerza Aérea de Chile, ENDESA, Universidad de Concepción e Instituto de Investigaciones Agropecuarias. Para este efecto se escribió un programa en lenguaje FORTRAN IV utilizándose un computador UNIVAC 9200 para procesar y analizar los resultados. La siguiente fue la mínima información requerida para procesar los datos (para cada una de las 9 estaciones) temperatura, humedad relativa, porcentaje de horas sol, velocidad del viento, precipitación, evaporación de bandeja Clase A medida. También se consideró la latitud, longitud y radiación extraterrestre.

El programa de computación se utilizó para relacionar los valores de evaporación medida, con los diferentes parámetros climáticos que fueron medidos en las correspondientes estaciones. Siguiendo el método dado por Christiansen (1968), y partiendo de un modelo matemático muy general, cada parámetro climático era relacionado varias veces con la evaporación medida con el objeto de desarrollar una fórmula que permitiera estimar evaporación de bandeja Clase A a partir de variables climáticas.

El modelo matemático general que se utilizó para estimar evaporación de bandeja fue:

$$EB = K_b \times RE \times CTM \times CHR \times CV \times CTD \times CEL \times CP \text{ donde:}$$

K_b = constante apropiada para evaporación de bandeja, adimensional.

RE = radiación extraterrestre que alcanza a la atmósfera de la tierra.

Esta se computa para el mes y la latitud correspondiente. Se expresa en las mismas unidades de evaporación dividiendo (como equivalente de evaporación) la radiación, Cal/cm²/día, por el calor de vaporiza-

Cuadro 1 — Promedios mensuales de valores de radiación extraterrestre, RE, expresados como equivalente de evaporación en milímetros por mes a 15°C.

Lati- tud	Ene	Feb	Mar	Abril	May	Jun	Jul	Ag	Sep	Oct	Nov	Dic
15	521,8	460,4	477,5	410,4	370,5	331,4	354,2	400,6	442,6	499,9	502,6	523,7
16	524,5	461,2	475,8	406,4	364,6	325,0	347,9	395,6	439,9	499,8	504,7	526,9
17	527,1	461,9	474,0	402,2	358,6	318,5	341,5	390,5	437,1	499,6	506,7	530,0
18	529,5	462,4	472,1	397,9	352,5	312,0	335,0	385,3	434,2	499,2	508,5	533,0
19	531,8	462,8	470,0	393,5	346,3	305,4	328,5	379,9	431,1	498,7	510,2	535,8
20	533,9	463,1	467,7	389,0	340,1	298,8	321,8	374,5	427,9	498,1	511,8	538,5
21	536,0	463,2	465,4	384,4	333,7	292,0	315,1	369,0	424,6	497,3	513,2	541,1
22	537,8	463,3	462,9	379,6	327,3	285,3	308,3	363,3	421,1	496,3	514,5	543,5
23	539,6	463,1	460,2	374,8	320,8	278,4	301,5	357,6	417,6	495,2	515,7	545,8
24	541,2	462,9	457,4	369,8	314,2	271,5	294,6	351,7	413,8	494,0	516,7	547,9
25	542,7	462,5	454,5	364,8	307,6	264,6	287,6	345,8	410,0	492,6	517,6	549,9
26	544,0	462,0	451,4	359,6	300,9	257,6	280,6	339,8	406,1	491,1	518,3	551,8
27	545,2	461,3	448,2	354,3	294,1	250,6	273,5	333,6	402,0	489,4	519,0	553,6
28	546,2	460,6	444,8	348,8	287,2	243,5	266,4	327,4	397,8	487,6	519,4	555,2
29	547,1	459,7	441,4	343,4	280,3	236,4	259,2	321,0	393,4	485,6	519,8	556,7
30	547,9	458,6	437,7	337,9	273,3	229,2	251,9	314,7	389,0	483,5	520,0	558,0
31	548,5	457,5	434,0	332,2	266,3	222,1	244,7	308,3	384,4	481,3	520,0	559,2
32	549,0	456,2	430,1	326,4	259,2	214,9	237,3	301,7	379,8	478,9	520,0	560,3
33	549,4	454,8	426,1	320,5	252,0	207,6	230,0	295,1	375,0	476,3	519,8	561,3
34	549,6	453,2	422,0	314,6	244,8	200,4	222,6	288,4	370,1	473,7	519,5	562,1
35	549,7	451,5	417,7	308,5	237,6	193,1	215,2	281,6	365,0	470,9	519,0	562,8
36	549,7	413,3	413,3	302,4	230,3	185,9	207,8	274,8	359,9	468,0	518,4	563,4
37	549,6	408,8	408,8	296,2	223,0	178,6	200,3	267,9	354,7	464,9	517,7	563,8
38	549,3	404,1	404,1	289,9	215,6	171,3	192,8	260,9	349,3	461,7	516,8	564,2
39	548,9	399,4	399,4	283,5	208,2	164,0	185,3	253,8	343,9	458,4	515,9	564,4
40	548,3	441,4	394,5	277,0	200,8	156,7	177,8	246,7	338,3	454,9	514,8	564,4
41	547,7	439,0	389,5	270,5	193,4	149,5	170,3	239,6	332,7	451,3	513,6	564,4
42	546,9	436,5	384,4	263,9	185,9	142,2	162,8	232,4	326,9	447,6	512,2	564,3
43	546,0	433,8	379,1	257,2	178,4	135,0	155,3	225,1	321,0	443,7	510,8	564,0
44	545,0	431,1	373,8	250,4	170,9	127,8	147,8	217,8	315,1	439,8	509,2	563,7
45	543,9	428,3	368,3	243,6	163,4	120,6	140,4	210,5	309,0	435,7	507,5	563,2
46	542,7	425,3	362,7	236,7	155,9	113,5	132,9	203,1	302,9	431,4	505,8	562,6
47	541,4	422,2	357,0	229,8	148,5	106,4	125,5	195,7	296,6	427,1	503,9	562,0
48	539,9	419,1	351,2	222,8	141,0	99,4	118,1	188,2	290,3	422,7	501,9	561,2
49	538,4	415,8	345,3	215,7	133,5	92,4	110,8	180,7	283,9	418,1	499,8	560,4

ción correspondiente a la temperatura media, T_M , y convirtiendo a unidades adecuadas, generalmente mm/mes.

Los valores de radiación extraterrestre, RE, aparecen en el Cuadro 1, y fueron calculados por el autor, a través de fórmulas para las diferentes latitudes del país.

La letra C que precede a cada una de las variables climáticas, indica que se trata de coeficientes para los respectivos parámetros. La definición de la simbología se explica más adelante.

Los coeficientes son adimensionales y tienen la siguiente forma general:

$$C_x = a \times bX \times cX^n$$

donde,

C_x representa el coeficiente para un determinado parámetro.

X representa la relación X/X_0 , donde X es el parámetro y X_0 es el valor aproximado al promedio del parámetro correspondiente.

n asumió un valor 2.

a, b y c son los coeficientes de la ecuación los que fueron calculados por el método del centroide de manera tal que $a + b + c = 1,0$.

También se utilizó el método de los mínimos cuadrados para determinar los coeficientes a, b y c pero se obtuvo mayor resultado por el método del centroide por lo cual se utilizó este último.

RESULTADOS Y DISCUSION

La nueva fórmula para estimar evapotranspiración potencial basado en la evaporación de bandeja Clase A, se indica a continuación:

$$ET_b = 0,328 \times RE \times CV \times CEL \times CTM \times CHR \times CTD \times CP$$

donde:

ET_b = es evapotranspiración potencial, considerando EB como índice de ET_p, mm/mes.

RE = es radiación extraterrestre en unidades de evaporación, mm/mes (Cuadro 1).

CV = $0,41 + 0,92 (V/10) - 0,33 (V/10)^2$.
Si V (la velocidad del viento, V, está dada en Km/hr a 10 metros de altura) es mayor que 14,0, CV = 1,06.

CEL = $0,94 + 0,06 (EL/1000)$.
EL es elevación sobre el nivel del mar, en metros.

CTM = $0,12 + 0,92 TM/15,0 - 0,04 (TM/15,0)^2$.
TM es temperatura media mensual en °C.

CHR = $1,13 - 0,13 (HR/0,70)^2$.
HR es el promedio mensual de la humedad relativa durante el día, expresada en forma decimal.

Cuadro 2 — Coeficientes para computar la fórmula de evapotranspiración potencial, ET_b, propuesta.

V	CV	EL	CEL	TM	CTM	HR	CHR	P	CP	TD	CTD
0	0,410	000	0,940	0	0,120	0,50	1,064	0	1,050	0	0,720
1	0,499	100	0,946	1	0,181	0,51	1,061	5	1,047	1	0,739
2	0,581	200	0,957	2	0,242	0,52	1,058	10	1,046	2	0,757
3	0,656	300	0,958	3	0,302	0,53	1,055	15	1,043	3	0,776
4	0,725	400	0,964	4	0,362	0,54	1,053	20	1,040	4	0,795
5	0,787	500	0,970	5	0,422	0,55	1,050	25	1,038	5	0,813
6	0,843	600	0,976	6	0,482	0,56	1,047	30	1,036	6	0,832
7	0,892	700	0,982	7	0,541	0,57	1,044	35	1,032	7	0,851
8	0,935	800	0,986	8	0,599	0,58	1,041	40	1,030	8	0,869
9	0,871	900	0,994	9	0,658	0,59	1,038	45	1,028	9	0,888
10	1,000	1.000	1,000	10	0,716	0,60	1,034	50	1,025	10	0,907
11	1,023	1.100	1,006	11	0,773	0,61	1,031	55	1,023	11	0,925
12	1,039	1.200	1,012	12	0,830	0,62	1,028	60	1,020	12	0,944
13	1,048	1.300	1,018	13	0,887	0,63	1,025	65	1,017	13	0,963
14	1,051	1.400	1,024	14	0,944	0,64	1,021	70	1,015	14	0,981
15	1,047	1.500	1,030	15	1,000	0,65	1,018	75	1,013	15	1,000
16	1,037	1.600	1,036	16	1,056	0,66	1,014	80	1,010	16	1,019
17	1,020	1.700	1,042	17	1,111	0,67	1,011	85	1,008	17	1,037
18	0,997	1.800	1,048	18	1,166	0,68	1,007	90	1,006	18	1,056
19	0,967	1.900	1,054	19	1,221	0,69	1,004	95	1,002	19	1,075
20	0,930	2.000	1,060	20	1,276	0,70	1,000	100	1,000	20	1,093
21	0,887	2.100	1,066	21	1,330	0,71	0,996	105	0,998	21	1,112
22	0,837	2.200	1,072	22	1,383	0,72	0,992	110	0,995	22	1,131
23	0,780	2.300	1,078	23	1,437	0,73	0,989	115	0,993	23	1,149
24	0,717	2.400	1,084	24	1,490	0,74	0,985	120	0,990	24	1,168
25	0,648	2.500	1,090	25	1,542	0,75	0,981	125	0,988	25	1,187
26	0,571	2.600	1,096	26	1,594	0,76	0,977	130	0,985	26	1,205
27	0,488	2.700	1,102	27	1,646	0,77	0,973	135	0,983	27	1,224
28	0,399	2.800	1,108	28	1,698	0,78	0,969	140	0,980	28	1,243
29	0,303	2.900	1,114	29	1,749	0,79	0,964	145	0,978	29	1,261
30	0,200	3.000	1,120	30	1,800	0,80	0,960	150	0,975	30	1,280
31	0,091	3.100	1,126	31	1,850	0,81	0,956	155	0,973	31	1,299
32	0,025	3.200	1,132	32	1,901	0,82	0,952	160	0,970	32	1,317
33	0,148	3.300	1,138	33	1,950	0,83	0,947	165	0,968	33	1,336
34	0,277	3.400	1,144	34	2,000	0,84	0,943	170	0,965	34	1,355
35	0,413	3.500	1,150	35	2,049	0,85	0,938	175	0,963	35	1,373
36	0,555	3.600	1,156	36	2,098	0,86	0,934	180	0,960	36	1,392
37	0,704	3.700	1,162	37	2,146	0,87	0,929	185	0,958	37	1,411
38	0,859	3.800	1,168	38	2,194	0,88	0,925	190	0,955	38	1,429

$$ET_b = 0,328 \times RE \times CV \times CEL \times CTM \times CHR \times CP \times CTD.$$

CTD = 0,72 + 0,28 (TD/15).

TD es diferencia de temperatura (máxima temperatura — mínima temperatura), media mensual en °C.

CP = 1,05 - 0,05 (P/100).

P es la precipitación media mensual, en milímetros.

Para facilitar los cálculos, la radiación extraterrestre, RE, y los coeficientes de la fórmula, fueron calculados y tabulados para el rango de valores que pueden encontrarse en Chile. En el Cuadro 1, aparecen los valores de RE para las distintas latitudes del país. En el Cuadro 2, aparecen los valores de los distintos parámetros climáticos con sus correspondientes coeficientes.

Para utilizar la fórmula propuesta debe ubicarse primero la latitud del área en estudio, entrando con esta información al Cuadro 1, donde se obtiene el valor de RE para los distintos meses. Con los promedios mensuales de los parámetros climáticos se entra al Cuadro

2, obteniéndose de ella los respectivos coeficientes. Finalmente, se multiplica el producto de los valores encontrados a través de los Cuadros 1 y 2, por el coeficiente 0,328 de la fórmula, obteniéndose así el valor de ETb para el lugar y mes correspondiente.

Como la evapotranspiración mensual para un cultivo específico está dado por la siguiente relación:

$$ETa = K \times ETb$$

es posible calcular, a través de la fórmula propuesta por el autor, la evapotranspiración mensual para cualquier cultivo multiplicando el valor de ETb por el coeficiente K correspondiente al cultivo y el mes. Con tal propósito en el Cuadro 3, se entregan los valores de dichos coeficientes para los cultivos más importantes del país. Estos coeficientes corresponden a una recopilación hecha por el autor del presente trabajo. Los coeficientes para tomate, maíz, papas, frejoles y maravilla han

Cuadro 3 — Coeficientes K para los diferentes períodos de crecimiento del cultivo, para ser utilizados en la fórmula de evapotranspiración potencial, ET, propuesta¹.

Cultivo	Porcentaje de la Estación de Crecimiento									
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Alfalfa	0,55	0,60	0,70	0,80	0,90	0,95	0,95	0,80	0,65	0,55
Avena, trigo primavera	0,15	0,20	0,30	0,40	0,55	0,75	0,85	0,90	0,90	0,30
Avena, trigo invierno	0,20	0,35	0,40	0,50	0,60	0,75	0,85	0,90	0,90	0,30
Arroz	0,80	0,85	1,05	1,20	1,30	1,30	1,20	1,10	0,90	0,50
Remolacha azucarera	0,30	0,45	0,70	0,80	0,85	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90
Frutales hoja caduca	0,20	0,35	0,65	0,70	0,75	0,70	0,60	0,50	0,30	0,20
Frutales con pasto	Promedio 1,00									
Cítricos y paltos	0,45	0,50	0,55	0,60	0,60	0,65	0,60	0,50	0,45	0,45
Tomate	0,25	0,45	0,57	0,75	0,95	1,15	1,07	0,80	0,65	0,50
Maravilla	0,18	0,38	0,56	0,73	0,92	1,07	1,06	0,86	0,60	0,45
Hortalizas arraig. sup.	0,10	0,25	0,45	0,60	0,60	0,55	0,45	0,35	0,30	0,25
Nogales	0,30	0,35	0,55	0,75	0,75	0,75	0,65	0,50	0,30	0,15
Maíz	0,30	0,50	0,70	0,87	0,91	0,82	0,75	0,65	0,45	0,35
Melón, viña zapallo	0,10	0,25	0,40	0,60	0,60	0,55	0,45	0,30	0,20	0,10
Papas	0,15	0,25	0,45	0,65	0,85	0,95	0,95	0,85	0,85	0,85
Frejoles	0,15	0,35	0,53	0,72	0,88	0,91	0,82	0,66	0,51	0,33
Trébol lad.	Promedio 0,95									

¹Estos coeficientes corresponden a una recopilación de antecedentes de $K = \frac{ETa}{EB}$ realizada por el autor.

Los coeficientes para Tomate, Maíz, Papas, Frejoles y Maravilla fueron obtenidos en la Estación Experimental La Platina.

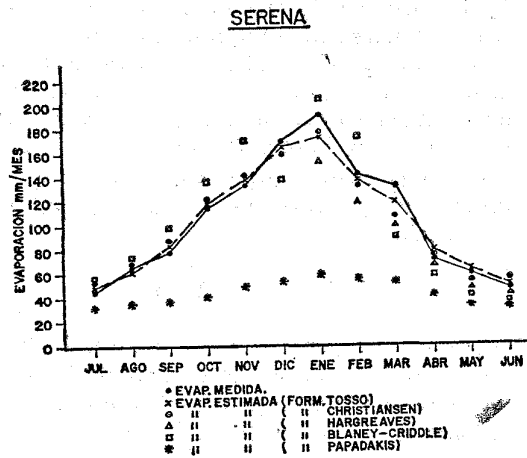


Figura 1 — Comportamiento de diferentes fórmulas para determinar evapotranspiración en relación a evaporación de bandeja clase A medida.

Cuadro 4 - Comparación de las fórmulas de Christiansen, Hargreaves, Blaney-Criddle, Papadakis y Toso con valores de evaporación de bandeja Clase A medidos en Chile.

	Chris- tiansen	Har- greaves	Blaney- Criddle	Papa- dakis	Toso
Error absoluto porcentaje	13,2	16,4	22,7	38,8	9,8
Desviación estándar	23,6	28,0	—	—	18,0
Coefficiente de correlación	0,89	0,85	—	0,82	0,93

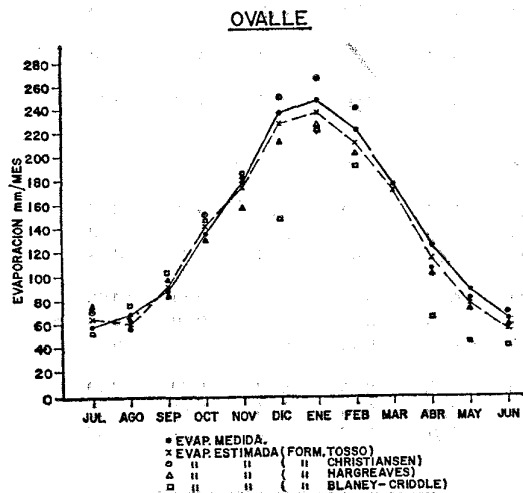


Figura 2 — Comportamiento de diferentes fórmulas para determinar evapotranspiración en relación a evaporación de bandeja clase A medida.

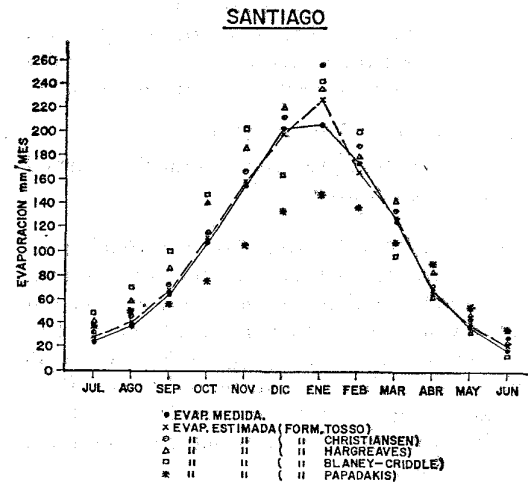


Figura 3 — Comportamiento de diferentes fórmulas para determinar evapotranspiración en relación a evaporación de bandeja clase A medida.

sido obtenidos en la Estación Experimental La Platina.

Con el fin de observar el comportamiento de los valores de evaporación estimados a través de la fórmula propuesta, en relación a la evaporación medida, se hizo un análisis de correlación el que aparece en el Cuadro 4. Con el mismo propósito, se analizó la desviación estándar y el error absoluto. A su vez, se comparó los resultados que entregan las fórmulas de Christiansen, Hargreaves, Blaney y Criddle, Papadakis y la propuesta en este tra-

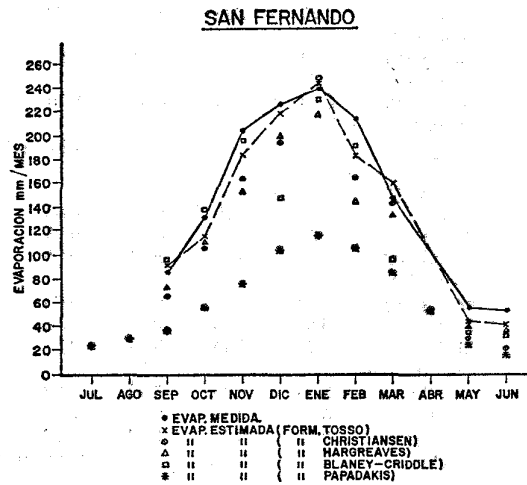


Figura 4 — Comportamiento de diferentes fórmulas para determinar evapotranspiración en relación a evaporación de bandeja clase A medida.

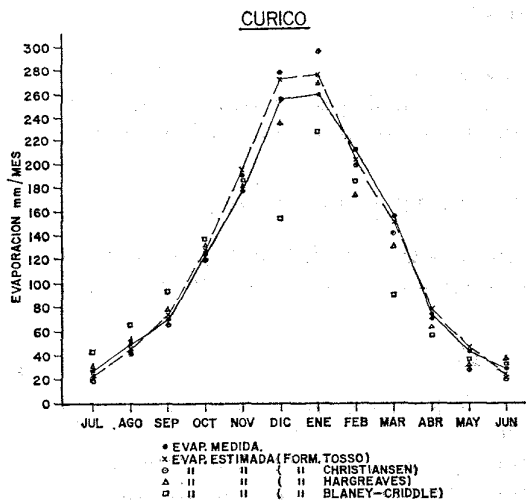


Figura 5 — Comportamiento de diferentes fórmulas para determinar evapotranspiración en relación a evaporación de bandeja clase A medida.

bajo (Tosso), con los valores de evaporación de bandeja clase A, medidos en el país.

De los resultados de dicho análisis cuyo resumen se indica en el Cuadro 4, se observa que la fórmula propuesta por el autor (Tosso) muestra la mejor correlación y los menores valores de error absoluto y desviación estándar.

En las Figuras 1 al 8, aparecen graficados los valores de evaporación entregados por las diferentes fórmulas analizadas en relación a los valores de evaporación medidos en las co-

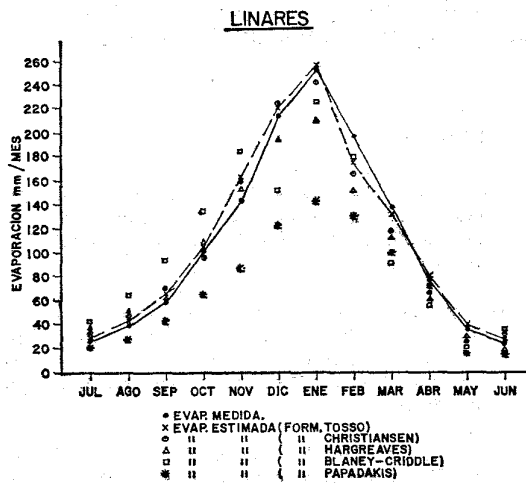


Figura 6 — Comportamiento de diferentes fórmulas para determinar evapotranspiración en relación a evaporación de bandeja clase A medida.

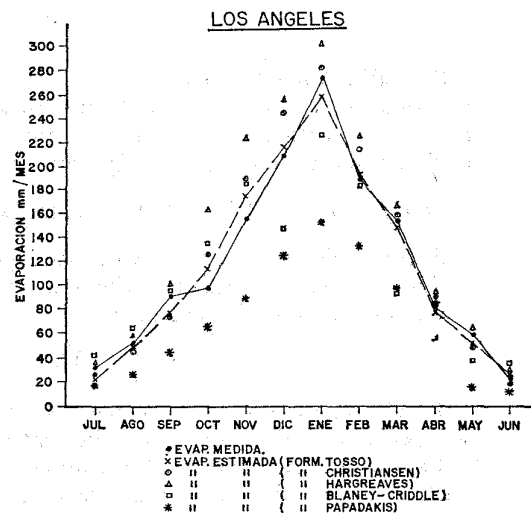


Figura 7 — Comportamiento de diferentes fórmulas para determinar evapotranspiración en relación a evaporación de bandeja clase A medida.

respondientes localidades a lo largo del país. La línea continua de las figuras corresponde a la evaporación medida y la línea cortada corresponde a la evaporación estimada por la fórmula propuesta. Los valores de las otras fórmulas no fueron unidos por líneas con el fin de permitir una mejor visualización de las figuras. En todas ellas se puede advertir que el comportamiento de la fórmula propuesta en relación a valores medidos para distintas zonas climáticas del país, es adecuado y superior al de las otras fórmulas con que fueron comparadas.

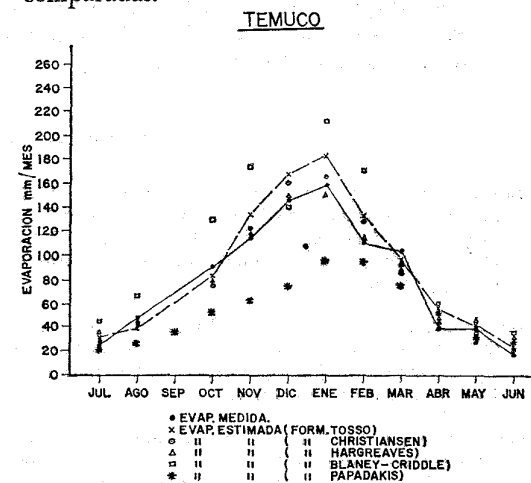


Figura 8 — Comportamiento de diferentes fórmulas para determinar evapotranspiración en relación a evaporación de bandeja clase A medida.

RESUMEN

Se realizó un estudio cuyo objetivo era analizar la información climática y de evaporación de bandeja clase A en Chile. De dicho análisis se obtuvo una relación matemática a través de la cual es posible estimar la evaporación de bandeja clase A la cual está representada por la siguiente ecuación:

$$ET_b = K_b \times R \times CTM \times CHR \times CV \times CTD \times CEL \times CP.$$

A través de la información de bandeja, considerada como índice de evapotranspiración potencial es posible estimar la evapotranspiración actual para cultivos específicos de acuerdo a la ecuación:

$$ET = K \times EB$$

En el presente trabajo se entregan los valores de K expresados en base a porcentaje del período de desarrollo para diferentes cultivos.

Para mayor facilidad en el uso de la fórmula de evaporación EB, los valores de los coeficientes climáticos, así como la radiación extraterrestre R, aparecen tabulados.

SUMMARY

A NEW FORMULA TO DETERMINE EVAPOTRANSPIRATION IN CHILE

A study was conducted in order to analyze the Chilean climatic and class A pan evaporation data. From this analysis a mathematical formula was obtained through which it is possible to estimate the class A pan evaporation. The formula is represented by the following general equation:

$$ET_b = K_b \times R \times CTM \times CHR \times CV \times CTD \times CEL \times CP.$$

With the information of pan evaporation, which is considered as an index of potential evapotranspiration and knowing the K coefficients, it is possible to estimate the actual evapotranspiration for a specific crop according to the following equation:

$$ET = K \times EB$$

In the present study, the K coefficients for different crops are given in a table. Part of them are the results of research conducted by the author at Platina Experimental Station, Santiago.

LITERATURA CITADA

- BLANEY, HARRY F. and CRIDDLE, WAYNE D. 1945. Method of Estimating Water Requirements in Irrigated Areas from Climatological Data. U.S. Dept. of Agric., Soil Conservation Serv., Divis. of Irrigation, pp. 1-17.
- BRUTSAERT, WILFRIED. 1965. Evaluation of some practical methods of estimating evapotranspiration in arid climates at low latitudes. Water Resources Res., vol. 1, Nº 2, pp. 187-191.
- CHRISTIANSEN, J. E. 1961. A rational approach to the estimation of evaporation and evapotranspiration from climatological data, Presented at the Joint Symposium sponsored by the Western Society of Soil Science, the American Meteorological Society and the American Society of Plant Physiologists, Western Section at Davis. 16 p.
- . 1968. Estimating pan evaporation and evapotranspiration from climatic data. Irrigation and Drainage Div., American Society of Civil Engineers.
- HARGREAVES, GEORGE H. 1966. Consumptive Use from Evaporation Pan Data. Paper presented at the American Society of Civil Engineers, Irrigation and Drainage Specialty Conference, Las Vegas, Nevada. pp. 35-62.
- JENSEN, M. C. and MIDDLETON, J. E. 1965. Scheduling irrigation from pan evaporation. Wash. Agric. Exp. Station, Circ. 386.
- PAPADAKIS, J. 1965. Potential Evapotranspiration. Edited by the Author. p. 54. Buenos Aires.

- PENMAN, H. L. 1948. Evaporation in nature. London Physical Soc. Rep. Prof. in Phys. 2: 366-368.
- PRUITT, W. O. 1960a. Correlation of climatological data with water requirements of crops. Ann. Rep. Irrig. Dept., Univ. Calif., Davis, Calif. p. 91.
- . 1960b. Relation of consumptive use of water to climate. Trans. American Soc. of Agric. Engineers. Vol. 3, N° 1.
- . 1966. Empirical method of estimating evapotranspiration using primarily evaporation pans. Evapotranspiration and its Role in Water Resources Management, ASAE Conf. Proc., 57-61.
- THORNTHWAITE, C. W. 1948. An approach toward a rational classification of climate. The Geographical Review 38 (1): 55-94.
- TOSSO, JUAN. 1972. Analysis of Chilean Meteorological Data to Estimate Evapotranspiration and Irrigation Requirements. Thesis required to obtain the M. Sc. Degree Majoring in Irrigation Engineering. College of Engineering, Utah State University, Logan, Utah, U.S.A. p. 110.