

PROCEDIMIENTO ANALITICO PARA PRONOSTICAR LA VELOCIDAD DE AGOTAMIENTO DE LA HUMEDAD DEL SUELO POR EFECTOS DE EVAPORACION Y TRANSPIRACION ¹

POR L. NIJENSOHN ², C. J. GRASSI ³ Y P. C. FEIJANDEZ'

ABSTRACT

An analytical procedure to predict the rate of soil moisture depletion by evaporation and/or transpiration.

Tomato plants of the Rome variety growing in a loam soil at Chacras de Coria, Mendoza, Argentina, stake trained and in fruit bearing period (February), were grouped in two types of plots: (I) normal crop conditions; (II) the shoots were cut few millimeters under the soil surface and the wounds covered with earth. The plants were left tied to the stakes in such a manner that the transpiration was interrupted, but simultaneously it was attempted to maintain the physical influence of the crop on the evaporation process.

Both treatments were plentifully irrigated at the beginning of the experiment in order to reach Field Capacity (21,5%) and since then they were not watered until 15 bars matric suction was obtained ($w = 10,0\%$). Plots were maintained free of weeds (pulling out the weeds by hand without modifying the land surface) and tomato fruits of (I) were weekly picked. Changes in soil water content were measured every 3 days by soil sampling.

Soil water depletion in the 0-60 cm soil layer was taken in (I) as evapotranspiration (ET) and in (II) as soil evaporation (E).

From the analysis of the experimental results it was concluded: 1) E and T may be expressed by the same general type of equation; which for the rate of ET, T and E, as a function of time, can be written:

$$\frac{dW}{dt} = -k(W - W_0)$$

Para la realización de este trabajo se contó con una subvención de la Comisión Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas de la República Argentina. • Profesor Titular efectivo de Edafología y Director del Instituto de Suelos

y Riego.

³ Profesor Titular efectivo de Hidrología Agrícola y Jefe de Sección del Instituto de Suelos y Riego.

' Investigador del Instituto de Suelos y Riego.

where t is the day after irrigation and k a constant possible to find out experimentally knowing the soil water content in any day after irrigation ; 2) The relative rate of E and T , being 100 the rate of E and T immediately after irrigation, is a linear function of the relative soil water content; 3) Once the value of k is known for ET and E in a definite ecologic complex, equations to predict: soil water content, velocity and absolute and relative accumulated amount of ET , E and T for a specific day t , may be established.

INTRODUCCION

En el presente trabajo se intenta establecer ecuaciones generales que hagan posible, conociendo las características climáticas, edáficas y culturales, predecir el contenido de humedad del suelo y la velocidad de evapotranspiración de un cultivo con posterioridad al riego.

Con ese objeto se analizaron datos experimentales obtenidos comparando la evolución de la humedad del suelo en parcelas con cultivo vivo y en parcelas donde éste no transpiró por haber sido interrumpida la comunicación de la parte aérea de las plantas con la subterránea.

En el análisis matemático de los datos experimentales se trabajó con los valores acumulados de agotamiento de la humedad edáfica, evapotranspiración, los que ofrecen una más simple representación gráfica del proceso.

En tal caso, las diferencias en la velocidad de evapotranspiración por efecto de cambios en las condiciones climáticas y en la energía de retención del agua en el suelo se suavizan, pudiendo los puntos experimentales ser abarcados por curvas que representan a ecuaciones tipo, fácilmente reconocibles.

Los procedimientos conocidos para calcular la evapotranspiración, aún los más expeditivos, se basan sobre datos meteorológicos del período considerado, por lo que es necesario efectuar ciertas determinaciones, diariamente, durante todo el lapso que interese.

Con el método propuesto, en cambio, se intenta predecir la evapotranspiración de un período entre riego y riego con sólo un par de valores (capacidad de campo y contenido hídrico de un día determinado), los que permiten obtener los parámetros de las ecuaciones planteadas.

Así mismo, se pretendió en el presente trabajo separar la transpiración del proceso integral de evapotranspiración, estableciéndose ecuaciones independientes para ambos fenómenos.

Las ecuaciones derivadas se aplicaron a otros datos experimentales que consigna la literatura, correspondientes a ensayos en diferentes condiciones, comprobándose que las mismas parecen ser de validez general.

MATERIAL Y METODOS

Los ensayos se realizaron en la localidad de Chacras de Coria, Mendoza, Argentina, en el campo experimental del Instituto de Suelos y Riego de la Facultad de Ciencias Agrarias.

El ensayo se realizó sobre tomate de la variedad Roma, el que se plantó a una distancia de 0,80 m entre hileras y 0,35 m entre plantas y cuyo cultivo se condujo "encañado", es decir, tutorado con cañas de acuerdo al estilo local.

Se establecieron cuatro parcelas: dos fueron sometidas a los tratamientos de Evapotranspiración (ET) y dos a los de Evaporación (E). Las dimensiones de las parcelas fueron de 4m X4m y, previamente a la plantación, fueron corregidos los desniveles y abordadas, de modo que el riego fuera uniforme en toda la superficie de cada una de ellas.

El suelo corresponde a la serie tentativa "Las Compuertas franco" y sus principales características hídricas figuran en el cuadro 1.

El ensayo abarcó desde el 2 de febrero al 9 de marzo de 1962 y los datos meteorológicos para el período considerado se consignan en el cuadro 2.

Los tratamientos ensayados fueron los siguientes:

a) Evapotranspiración

El 2 de febrero por la mañana se regaron las parcelas con lámina suficiente como para llevar todo el perfil del suelo a capacidad de campo; a partir de ese momento y hasta el fin de la experiencia no se volvió a regar. Se mantuvo el cultivo limpio de malezas, las que fueron arrancadas "a mano", sin disturbar la superficie del suelo. Se cosecharon los frutos a medida que los mismos fueron madurando. Cada tres, o excepcionalmente cuatro días, se extrajeron con caño tipo Veihmeyer muestras de tierra de 20 cm en 20 cm hasta los 60 cm de profundidad y la humedad se determinó por desecamiento a estufa a 105°C.

b) Evaporación

Inmediatamente después del riego del día 2 de febrero, se cortaron los tallos de las plantas pocos milímetros por debajo del suelo y se cubrió el corte con tierra. Las plantas quedaron en su posición primitiva, atadas a las cañas. De esta manera se evitó la continuación de la transpiración y se intentó conservar la influencia del cultivo, especialmente el de su sombra, sobre el proceso de evaporación.

CUADRO 2

Datos meteorológicos correspondientes al período 2 de febrero-9 de marzo 1962.
Chacras de Coria-Mendoza-Facultad de Ciencias Agrarias

Fecha	Temperatura		Tensión de vapor	
	Medi f. °	Máxima teC	Media diaria ml	Saturado temp. máx. mb
2-11.	24,2	29,0	17,2	30,04
3-11.	26, 1	31,7	17,2	35,06
4-11.	22,5	26,4	18, 7	25,81
5-11.	25,1	29,4	19, 1	30,74
6-1J.	21,3	25,2	18,6	24,04
7-11.	23,1	27,0	18,4	26,74
8-1J.	20,7	25,8	18, 4	24,91
9-II.	21, 1	26,3	18, 1	255,66
10-11.	23,0	28,0	16,8	28,35
11-11.	24,3	29,4	16,5	30,74
12-II.	24,4	29,3	17,5	30,57
13-II.	24,1	28,5	18,6	29,18
14 -1J.	23,4	27,4	17,7	27,37
15-11.	24,3	28,8	18, 2	29,69
16-II.	24,5	29,0	18,8	30,04
17-1I.	23,1	27,3	13,5	27,22
18-11.	17,1	22,7	12, 8	20,69
1f1-11.	21,9	28,5	15,2	29,18
20-11.	23,1	28,3	15, 5	28,85
21-11.	23,0	27,4	13, 3	27,37
22-11.	21,7	26,5	11,7	25,97
23-1 I.	16,2	22,0	10, 8	19,83
24-11.	19,0	23,7	13,0	21,98
25-II.	20,8	26,2	14,4	25,51
26-1 [.	18,0	22,5	15,0	20,44
27-1.	18,1	22,3	15,6	20,24
28-1 J.	21,4	25,7	17,3	24,77
Prom. 2/28 feb.	22, 1	26,8	16,21	35,22
1-III.	22,4	27,3	17,3	27,22
2-III.	23,1	29,2	17,5	30,39
3-III.	21,7	27,0	18,2	26,74
4-III.	20,3	24,5	15,4	23,34
5-UI.	22,0	27,8	17,5	28,02
6-III.	24,6	30,5	18,9	32,74
7-III.	24,1	29,0	18,2	30,04
8-III.	21,1	26,5	17,7	25,97
9-III.	21, 9	26,2	14,9	25,51
Prom. 1/9 marzo	22,3	27,5	17,28	36,81

El procedimiento se inspiró en una técnica utilizada por KUEN y BMRHUIZEN (1959) quienes en condiciones de invernáculo, simularon el efecto del cultivo en la evaporación directa del suelo clavando sobre el terreno cintas de papel parafinado de color verde. En lo relativo al control de malezas, cosecha y extracción de muestras, se procedió en forma idéntica al tratamiento "ET".

La fase vegetativa del cultivo en el momento de comenzar las experiencias era de plena producción.

RESULTA DOS

En el cuadro 3 se consignan los datos de contenido de humedad porcentual en peso (w g fg') encontrados como promedio de las determinaciones sucesivas efectuadas en las dos parcelas sometidas al tratamiento ET. Cuando las extracciones de muestras fueron precedidas de lluvias mayores de 2 mm, las mismas se tomaron en cuenta para corregir, aumentando proporcionalmente, el w promedio de toda la profundidad considerada. Como esta última era la de exploración radical -60 cm- y el peso específico aparente medio el de 14 g cm^3 , cada 84 mm de lluvia equivalían a un incremento del 100% en el contenido de humedad edáfica.

En el cuadro 4 se transcriben en la misma forma explicada más arriba los datos experimentales de w encontrados para las parcelas sometidas al tratamiento de E.

10 Evapotranspiración:

Graficados los datos del cuadro 3 y analizada la forma de la variación de los mismos, se consideró que ella podría responder a una ecuación exponencial de extinción del tipo:

$$w_t \% ET = w_{t_0} \% \cdot e^{-kt} \quad 1)$$

donde w_t es el contenido de agua en el suelo a los t días después del riego; w_{t_0} es el contenido de agua en el suelo inmediatamente después del riego; e es la base de los logaritmos naturales y k una constante propia del proceso, cuyo significado discutiremos más adelante.

Mediante el procedimiento de "rectificación" (aplicando en este caso logaritmos) se constató que el tipo de ecuación propuesta se ajustaba a los datos del ensayo. Empleando entonces el procedimiento de los mínimos cuadrados y en función de los datos experimentales, se determinaron los parámetros de la ecuación empírica propuesta, que quedó, para las condiciones de la experiencia, así:

$$w_t \% ET = 20,0 \cdot e^{-0,0254t}$$

CUADRO 3

Variación del contenido de humedad edáfica (<w> g%g ') en las parcelas sometidas a evapotranspiración

Fecha	Dí N°	Profundidad				Promedio conegillo por lluvia	Observaciones
		0-20 cm	20-40 cm	40-60 cm	Promedio 0-60 cm		
2-II-62	0	no det.	no det.	no det.	no det.	20,00	Hiego eu exceso. Dato obtenido por extrapolación matemática
5-II-62	3	20,2	19,2	17,5	18,90	18,90	
9-II-62	7	19,8	10,3	17,8	18,96	17,95	8 mm el día 8/11
12-II-62	10	14,0	16,1	16,0	15,33	15,33	
16-II-62	H	14,0	14,5	15,4	14,63	14,63	1 mm entre días 14 y 16 de febrero
19-II-62	17	10,0	16,6	12,7	11,10	11,10	
23-II-62	21	10,9	11,5	11,5	11,30	11,30	
26-II-62	24	11,2	11,3	12,4	11,63	10,90	6 mm el día 25/II
2-III-62	28	11,0	10,3	11,6	10,96	10,60	2,4 mm el día 7/III
9-III-62	35	9,6	9,7	9,8	9,70	9,50	2 mm el día 7/III

27
2
0
2
N
E
E
5
g
>
t

CUADRO 4
Variación del contenido de humedad edáfica (w g °lo g-1)
en las parcelas sometidas a evaporación

Fecha	Día N°	Profundidad			Promedio	Humedad corregida por lluvias
		0-20 cm	20-40 cm	40-60 cm		
5-11-62.	3	19,9	21,5	19,7	20,4	20,40
9-11-62.	7	17,7	20,5	20,65	19,6	18,60
12-11-62.	10	15,4	20,6	19,5	18,3	18,30
16-11-62.	14	16,5	19,1	18,6	18,0	18,00
11-11-62.	17	14,4	18,5	18,0	16,9	16,90
23-11-62.	21	14,4	16,6	18,1	16,3	16,30
26-11-62.	24	15,4	16,8	18,0	16,7	15,97
2-12-62.	28	13,7	14,8	16,7	15,7	15,34
9-12-62.	35	13,7	14,9	15,8	15,1	14,90

Con la ecuación (2) se trazó la curva de variación de w versus t (fig. 1), para las parcelas sometidas a ET y se marcaron, además, los puntos encontrados experimentalmente.

Si transformamos (multiplicando por 84) los w diarios en contenido de agua del perfil, expresados, en mm de altura de lámina - w_{mm} -, la ecuación (1) puede escribirse:

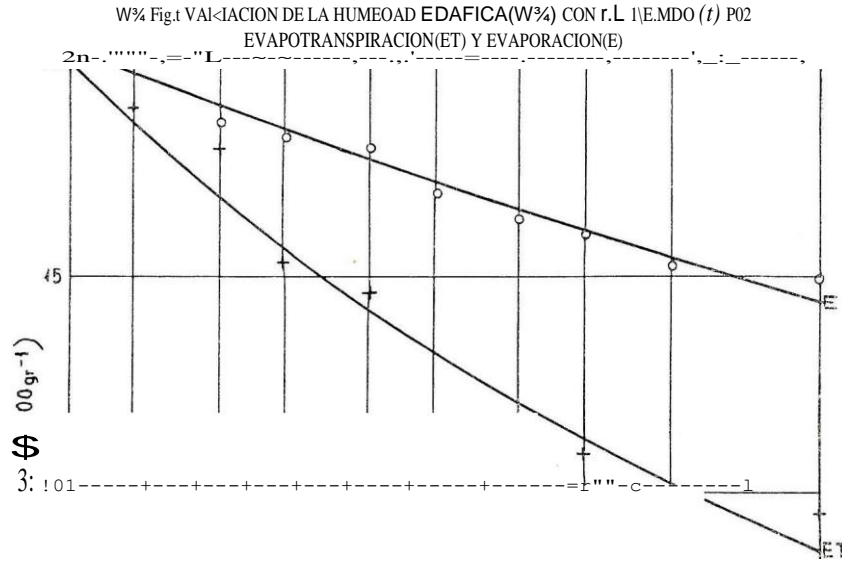
$$w_{mm} - E_T = w_{mm} - k \cdot (w_{mm} - w_{mm}) \quad (3)$$

donde k sigue teniendo el mismo valor que en (2), mientras que $w_{mm} = 168$ mm.

t) Velocidad de, ET diaria

A la disminución de w mm operada entre dos días sucesivos puede considerársela como la velocidad de evapotranspiración diaria, ET m.m/día. ET sería, la velocidad de ET en el día t , y corresponde a la disminución w en el día t con respecto al día anterior, expresada en mm. Para obtener la ecuación de ET , mm/día se derivó la (3) en función del tiempo:

$$ET, \text{ mm/día} = \frac{dw_{mm}}{dt} = -k \cdot (w_{mm} - w_{mm}) \quad (4)$$



4 J, i i# 2 r 2 a 2 s S t di.,s

$$W = W_0 \cdot e^{-k t}$$

$$E.T. W_t \% = 20 \cdot e^{-0,02394 t} \quad E. W_t \% = 20,33 \cdot e^{-0,009679 t}$$

Cultivo, *Toma/e*
 Periodo, *1/11 - 1/4' - 1/62*
 Prohue/01 a 60 m

t	ET	fT (e.p.) +	E	E' (e.p.) °
0	20,0	20,0	110,13	20,93
3	8,61	10,90	19,75	2,040
7	6,88	17,95	1,901	18,60
10	5,74	5,33	18,50	18,30
14	4,213	14,63	17,76	16,00
17	3,24	8,10	17,22	16,90
21	2,12	1,30	16,61	16,30
24	1,30	10,90	16,15	15,97
28	0,82	10,6	15,52	+83, -1
235	0,62	9, 1	14,47	(4,90 i

En nuestro caso, sustituyendo por los valores correspondientes, podemos escribir:

$$ET_t \text{ mm/día} = -4,02 \cdot e^{-0,301 t} \quad (5)$$

Con la ecuación (5) se trazó la curva de variación de la velocidad de ET en función del tiempo (fig. 2).

) *ET acumulada*

Para calcular el agua evapotranspirada hasta un día t , es decir, la evapotranspiración acumulada $\int ET_t \text{ mm}$, se integró la ecuación (4) entre los límites t y t_0 .

$$\int_t^{t_0} ET_t \text{ mm} = \int_t^{t_0} -k w_{t_0} \text{ mm} e^{-kt} dt = w_{t_0} \text{ mm} e^{-kt} \Big|_t^{t_0} \\ \int ET_t \text{ mm} = w_{t_0} (1 - e^{-kt}) \quad (6)$$

Esta ecuación en nuestro caso, tiene los siguientes valores:

$$\int ET_t \text{ mm} = 1,05 (1 - e^{-0,301 t}) \quad (7)$$

Con la ecuación (7) se trazó la curva de *ET acumulada vs. tiempo* (fig. 3), en la que se ubicaron también los puntos encontrados experimentalmente, calculados de acuerdo a los contenidos de humedad del cuadro 3.

Para visualizar las relaciones entre la variación de la *velocidad de ET* y la *ET acumulada* se expresaron esas magnitudes de la siguiente manera:

e) *velocidad relativa de ET:*

$$\frac{c, T}{1} \quad ET_t \text{ mm/día } 10$$

d) *ET acumulada como porcentaje relativo del agua disponible en el día t:*

($ET_t \text{ mm}$, como $\% \text{ wd, mm}$), donde 100% de wd es equivalente a la diferencia entre los contenidos de agua correspondientes a la Capacidad del Campo (W_c) y la Capacidad de Punto de Marchitamiento (W_m) expresados en mm. Cuando $ET_t \text{ mm}$ es igual a cero, wd es igual a 100.

Fig.2 VARIACION DE LA<; VELOCIDADES DE EI Y E (mm d, .. -1) CON EL TIEMPO

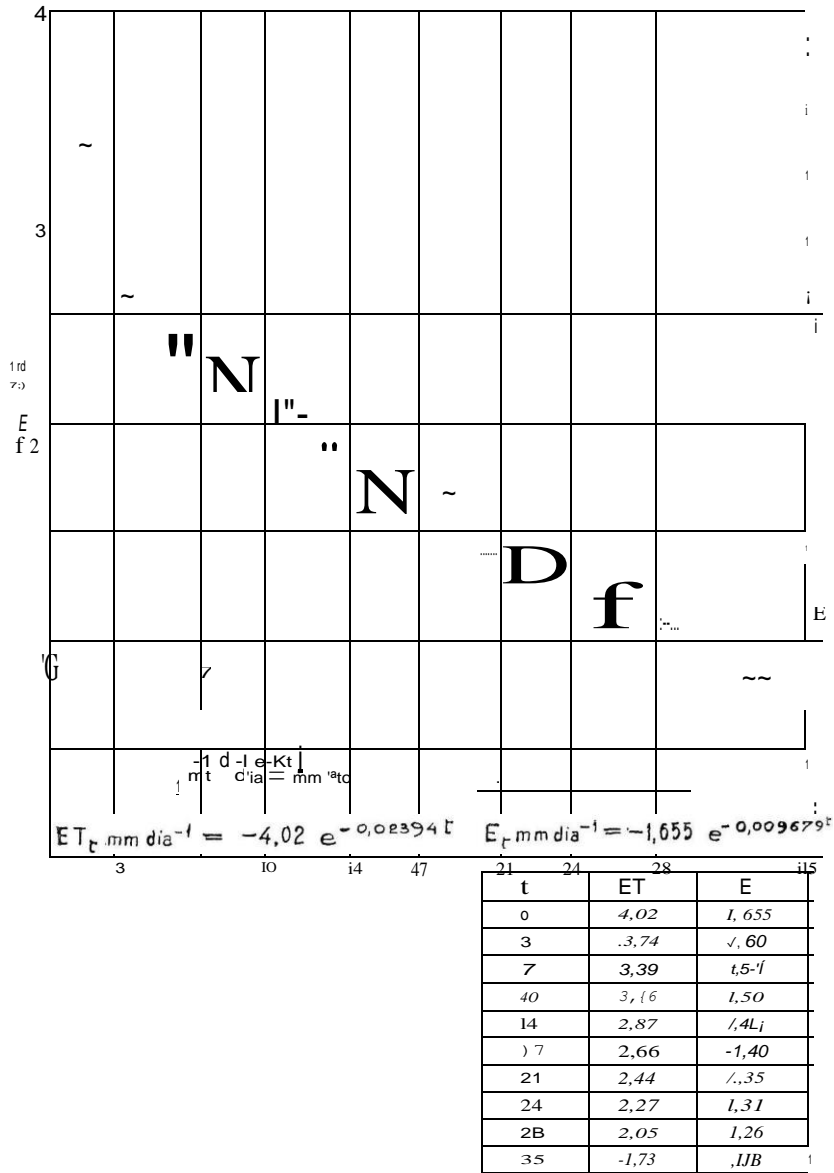
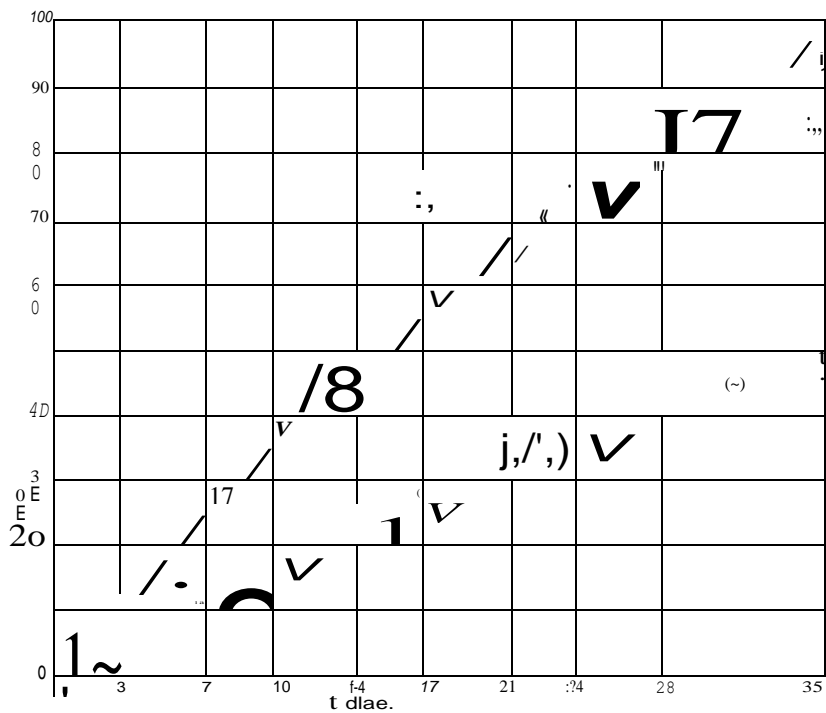


Fig.3 EVAPOTRANSPIRACION V EVAPORACION ACUMULADA5 (~mm)



$$mm, = W + mm (\ll -kt)$$

ET ::::mmt=168(i-e-o,02394.t)

E::Emmt i71(i-e-o,02a<>Ltt)

t	E1	E	EFICIENCIA MET X	EXPERIENCIA E O
0	0	0	0	0
3	iJ,••	4.89	9,1	
7	2G,17	H,0"	473	A4°
10	35,77	45,9	39,1	i6,9
14	48,9 ⁵	21,61	4s °	49,•
17	56,78	26,16	74,°	207
21	66,10	31,°	73,°	337
24	73,9e	35,•4	76,°	36,S
28	82,_"	40,«7	79,°	41,8
35	95,5P	49,30	88,°	45,5

Para calcular el agua disponible correspondiente a cada z mm se puede emplear la siguiente ecuación general:

$$\% \text{ wclt mm} = 100 \left[1 - \frac{vV_{cmm}(1-e^{-kt})}{wdt \text{ mm}} \right] \quad (8)$$

la que, para las condiciones de nuestro ensayo, es:

$$\% \text{ wd, mm} = 100 \left[1 - \frac{168 (1 - e^{-0.0004t})}{88} \right] \quad (9)$$

la ecuación (9) es la ele una de las rectas representadas en la figura 4.

f) ET acumulada como Porcentaje Relativo del Contenido Total de Agua:

(ET,mm, como $\% \text{ wmm}$) : donde $100 \% \text{ wmm}$ es la capacidad de almacenamiento de agua de la profundidad considerada expresada en mm, es decir, W e mm.

Para calcular el porcentaje relativo de agua existente en un momento t se puede emplear la siguiente ecuación general:

$$\% \text{ wmm} = 100 \left[1 - \frac{ET}{W, \text{ mm}} \right] \quad (10)$$

y reemplazando la evapotranspiración acumulada por su valor según ecuación (7), y considerando que en nuestro caso $W = 168 \text{ mm}$, tenemos:

$$\% \text{ wmm} = 100 \left[1 - \frac{168 (1 - e^{-0.0004t})}{168} \right] \quad (11)$$

La ecuación (11) es la de la otra recta representada en la figura 4.

f) Relaciones entre la velocidad relativa de ET y los porcentajes relativos de agua disponible y de contenido total de agua:

En el cuadro 5 se consignan esos valores calculados de acuerdo a los datos experimentales y las relaciones correspondientes se representan gráficamente en la figura 4.

CUADRO 5

Velocidades relativas diarias de evapotranspiración y evaporación (ET; °,E) y porcentajes relativos de agua disponible (%o wd) y contenido de agua total (O/o w)

Día N°	Parcelas de evapotranspiración			Parcelas de evaporación		
	i, wd	w	%ET	wd	O w	E
0 .. '.....	100	100	100	100	100	100
3	86,7	93,0	93,0	94,6	97,1	96,0
7	70,2	84,4	84,3	90,3	93,5	93,0
10	59,3	78,7	78,6	83,3	91,0	90,6
14 .. '.....	47,6	71,4	71,3	76,2	87,3	87,5
17 .. '.....	35,4	66,2	66,2	71,2	84,7	84,7
21	27,2	60,6	60,7	65,9	81,8	81,5
24	16,9	56,5	56,5	61,3	79,4	79,1
28 "	6,6	51,8	51,0	55,5	76,3	76,1
35	0,0	44,0	43,0	45,8	71,1	71,2

2
9 Evaporación:

Los datos de humedad edáfica que figuran en el cuadro 4, correspondientes a las variaciones de la misma en función del tiempo por efecto de la evaporación, pueden ser interpretados por la misma ecuación de extinción (1). Es decir $w, \% E - w_a . e,$

Empleando el mismo método que para los datos de evapotranspiración se encontraron los valores correspondientes para las condiciones del ensayo, obteniéndose la siguiente ecuación:

$$W, \% E = 20,3 . e^{-0,009679 t} \quad (12)$$

Con la ecuación (12) se trazó la curva de variación del contenido de agua en función del tiempo en parcelas sometidas a E y se marcaron, además, los puntos obtenidos experimentalmente (fig. 1).

Con el mismo criterio empleado en los cálculos y transformaciones para la ET, se expresó la variación de la velocidad de evaporación, en mm/día, en función de los días transcurridos desde el riego. La ecuación correspondiente adopta la misma forma general de la (4), y los valores correspondientes son:

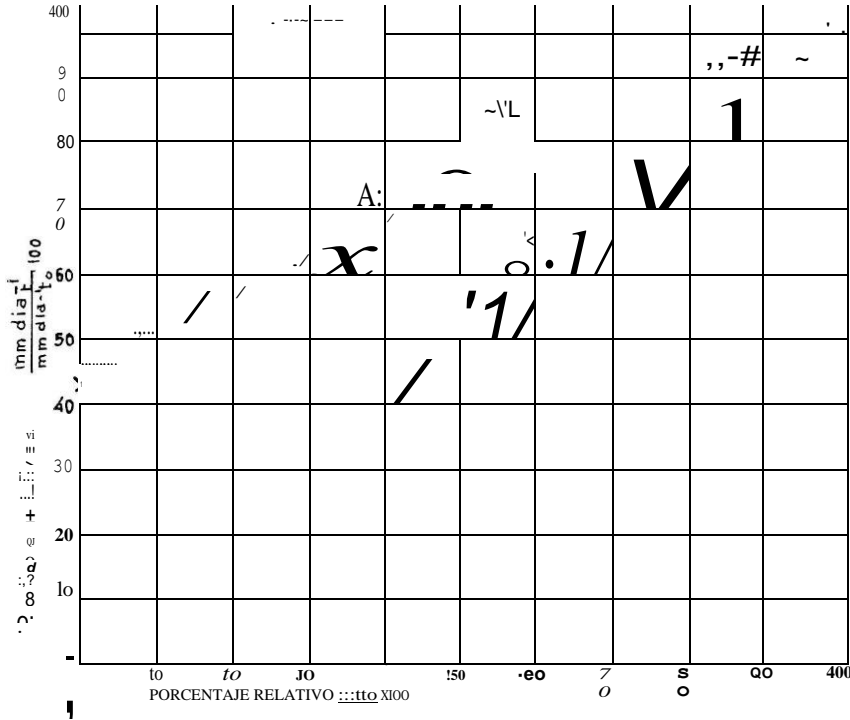
$$E_t \text{ (mm/día)} = 1,61 . e^{-0,009679 t} \quad (13)$$

Con los datos calculados a partir de esta ecuación se dibujó la curva E mm/día vs. t , que se consigna en la figura 2.

Para calcular la evaporación acumulada en un día t se empleó la fórmula general (7), la que para el caso de la E , en nuestro ensayo, toma los siguientes valores:

$$E_t \text{ mm} = 171(1 - e^{-11.11010,1 t}) \quad (U)$$

Fig. VARIACION DE LAS VELOCIDADES RELATIVAS DE ET Y E EN FUNCION DE LA HUMEDAD EDAFICA -HA1\VA



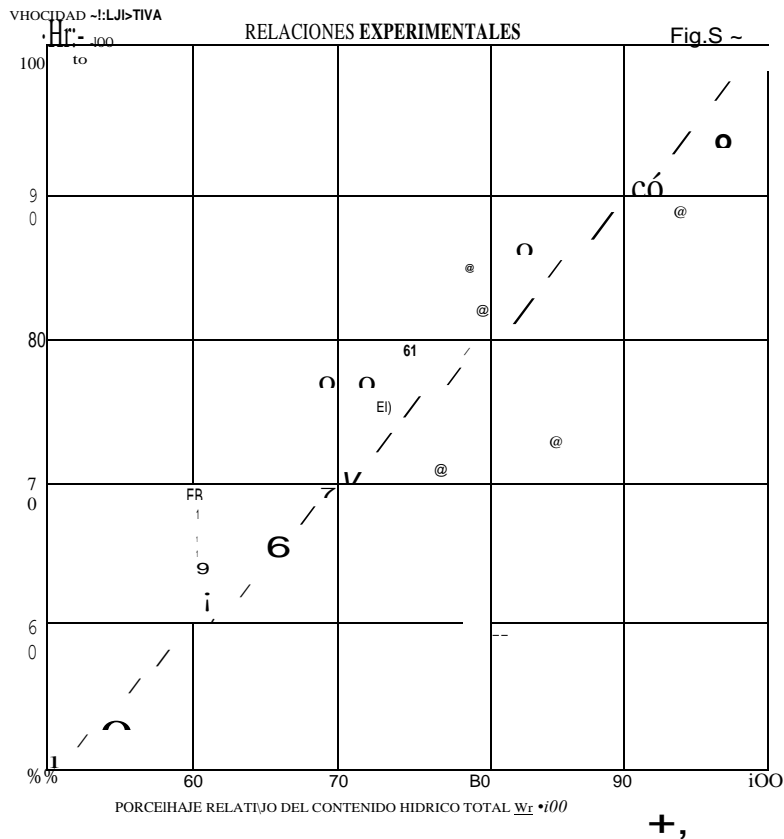
Con la ecuación (14) se trazó la curva de *evaporación acumulada v. tiempo* (fig. 3), en la que se ubicaron también los puntos encontrados experimentalmente, calculados de acuerdo a los valores de w consignados en la tabla 4.

Al igual que para la ET, se relacionó la *velocidad relativa de evaporación*

$$\text{Velocidad relativa de E} = \frac{E, \text{ mm día}^{-1}}{E_t, \text{ mm día}^{-1}}$$

con el agua disponible y con el agua total en ese mismo día t , expresados también como porcentajes del agua disponible y del agua total en el momento inicial t_0 .

Estas relaciones se expresaron gráficamente en la figura 4 y los datos correspondientes están consignados en el cuadro 5.



- @ Wria - arenoso - franco Nijensohn et al (1965)
- EB Alfalfa- Franco-Limoso }
- O Praderas-Franco-Limoso W,liardson (1963)
- G Ca'rtamo-Franco-Limoso Grassi (1963)

DISCUSION

19 EVAPOTRANSPIRACIÓN

La validez de la ecuación general (1), que expresa que "en una parcela sometida a evapotranspiración la humedad del suelo, en un día "t" después del último riego o lluvia abundante, es función

de la humedad inicial y decrece exponencialmen/;e con el aumento del valor "t de acuerdo a una constante de extinción "k" propia de las condiciones en que se desarrolla el proceso", surge de la exitosa aplicación de la misma a los datos experimentales hallados. En efecto, la curva de variación de $w\%$ vs. t debida a ET, de la figura I, trazada de acuerdo a la ecuación específica (2), derivada de la (1), concuerda satisfactoriamente con los puntos encontrados experimentalmente.

La humedad edáfica en el momento t ($w_a\%$) fue hallada analíticamente y resulta ser algo menor que la correspondiente a la capacidad de campo máxima.

Eso se puede explicar por la acción evapotranspiratoria durante el primer período de redistribución del agua incorporada con el riego. Esta diferencia, sin embargo, no es grande, y, a los efectos de los cálculos, en todas las ecuaciones encontradas se asimiló w a W .

La importancia de la ecuación general (1) y de su específica (2) se ve resaltada por la posibilidad de pronosticar la velocidad de ET a un día t después del riego, así como la *ET acumulada* hasta ese día, mediante la aplicación de las ecuaciones matemáticamente derivadas de ellas, las (5) y (7). En la figura 3 puede observarse, en la curva de ET acumulada vs. tiempo, cómo concuerdan los datos experimentales con el trazado de la curva descripta por la ecuación (7).

Es sumamente interesante constatar que la disminución relativa de velocidad ET es una función lineal, inversamente proporcional, del porcentaje también relativo- del agua útil en el suelo. Esto permitiría predecir, conociendo las capacidades W , y W , de un suelo y su w , %, la velocidad relativa con que se está evapotranspirando el agua en ese día t.

Es muy sugestivo, como veremos luego, que la misma recta que describe la dependencia de la velocidad de ET con el porcentaje de agua disponible en el suelo, contenga también los puntos que relacionan la velocidad de evaporación relativa con ese misma característica edáfica.

La misma observación anterior resulta del examen de las relaciones entre las velocidades relativas de ET y E con respecto al porcentaje relativo de contenido total de agua en el suelo, hasta el correspondiente a W . En estos casos la recta de proporcionalidad tiene un ángulo de 45° . es decir: *la velocidad relativa de, ET y de E tiene el mismo valor numérico que la proporción relativtj de agua total en el suelo, desde W, a IV,*

Con el fin de verificar la general validez de dicha conclusión, se ha aplicado el procedimiento al análisis de datos experimentales de diversa procedencia obtenidos en distintos cultivos y tipos de suelos: en viña: NIJENSOHN *et al.* (1965): en alfalfa. Wcox, citado por WILLARDSON (1963), y en cártamo. GRASSI (1963).

Tal como lo muestra la figura 5, donde se han representado relaciones de W_a/W vs. ET_c/ET , pertenecientes a cuatro experiencias, la recta de 45° recorre la faja determinada por los puntos respectivos.

Consideraciones sobre "k":

En la ecuación general (1) y en todas las demás, derivadas de ella, tiene una importancia fundamental el valor de k , dado que el otro parámetro. w . es una constante que depende esencialmente del suelo y es prácticamente igual a su capacidad de campo.

Al ser k el coeficiente de extinción del fenómeno ET, su valor es el de la pendiente de la recta que representa a la ecuación (1) cuando se la lleva a escala logarítmica.

En efecto, tomando logaritmos naturales:

$$\ln wkt + \ln w,$$

A mayor valor de k corresponde una más rápida disminución de la velocidad de ET con el correr del tiempo, pues constituye un exponente negativo en la ecuación (5). pero a mayor valor de k corresponde también una mayor velocidad inicial, dado que en la misma ecuación (5) y en el momento inicial, t es igual a cero y, por lo tanto, anula a k exponencial, mientras que la velocidad queda definida por el producto entre el mismo k y el contenido inicial de agua de la profundidad considerada, expresada en mm (w mm). El valor de k depende, indudablemente, de: características edáficas, condiciones meteorológicas, tipo y fase y/o edad del cultivo; su valor es el más importante para definir todas las circunstancias ligadas con un determinado período de ET.

Determinación de k:

Para determinar el valor de k , propio de cada complejo suelocultivo en un período determinado de su ciclo, podría seguirse alguno de los siguientes caminos:

a) *Análisis matemático de los datos experimentales de la variación de la humedad edáfica a través del período considerado:*

Esto es lo que hemos hecho en este trabajo con el método de los mínimos cuadrados.

Indudablemente, es el método más exacto y el que debe emplearse para definir el proceso evapotranspiratorio de un determinado conjunto suelo + planta + período. Pero tiene el inconveniente de que debe completarse el total de observaciones para calcularlo, lo que impide utilizarlo ese mismo año para prever el consumo de agua y establecer de esa forma las necesidades de riego.

o) *Deducción a partir de una determinación de humedad' dentro del período:*

Despejando el valor de k de la ecuación (1) tenemos que:

$$k = \frac{1}{t} \ln \frac{W_0}{W_t} \tag{15}$$

Es decir, que conociendo el valor w % en el momento t, que podemos suponer igual a la capacidad de campo, y la humedad del suelo en un día t, podemos encontrar el valor k.

Ejemplo: en nuestro caso a los 14 días hemos encontrado una humedad promedio en los 60 cm de 14,63 % para un suelo cuya W_c es de 20,5 %. Entonces:

$$k = \frac{1}{14} \ln \frac{20,5}{14,63} = \frac{32042 - 2,68381}{14} = 0,024$$

Este valor k hallado con una sola determinación de humedad (0,024), no difiere significativamente del hallado con todos los datos del período: 0,02351.

Relaciones entre el valor de k, la ET y la humedad inicial:

Si en la ecuación (4) hacemos t igual a cero, queda:

ET, mm/día = k . wmm, de donde podemos despejar

$$k = \frac{ET, \text{ mm/día}}{W, \text{ mm}} \tag{16}$$

Es decir, que el valor de k es igual a la razón entre la ET del momento inicial, expresada en mm/día, y el contenido total de agua del suelo, expresada también en mm. Por lo tanto, la dimensión de k es la de T⁻¹.

En (16) el valor de denominador para un caso determinado es conocido y podemos calcularlo conociendo W_c %, la profundidad y el peso específico de la capa de suelo considerada.

Con respecto a la ET inicial, en el momento t₀, podemos hacer las siguientes consideraciones:

a) Dificultades metodológicas harían muy difícil, si no imposible, la determinación experimental de la velocidad inicial de ET. Por otra parte, podría no coincidir la ET, real, determinada en el primer instante del proceso, con el valor que resultaría de la extrapolación matemática de la curva que describe su desarrollo. En nuestro caso, por ejemplo, hemos determinado *ET* mm/día

aplicando la ecuación (5) encontrada con valores experimentales, el primero de los cuales corresponde a los 3 días de iniciada la ET y el último a los 35 días.

b) Mirada de esa manera, la velocidad inicial de ET, que interesa en (16) no está determinada únicamente por las características de suelo + planta + condiciones meteorológicas, presentes en el momento t , sino que depende del complejo de estos factores durante todo el período ET a considerar.

e) Para un suelo determinado y para un cierto cultivo durante una cierta fase de su desarrollo, podemos suponer que ET es función de los requerimientos meteorológicos (radiación, déficit de saturación, viento, etc.) que determinan lo que se da en llamar Evaporación Potencial del período.

d) Sobre la base de esta hipótesis se calculó la velocidad de evapotranspiración potencial media del período 2 de febrero-9 de marzo 1962, usando los datos meteorológicos reales consignados en el cuadro 2 y con las siguientes fórmulas: THORNWAITE (1948) ; BLANEY y CRIDDLE (1950) y PAPADAKIS (1962). Los valores respectivos obtenidos fueron: 5.0 mm/día; 5.7 mm/día y 3.58 mm/día.

e) Llamando f a la relación entre ET, n mm/día calculada de acuerdo a los datos experimentales y los distintos valores de evaporación potencial calculados de acuerdo a las fórmulas citadas, tenemos:

Para Thorwaite: $f = 114$.

Para Blaney y Criddle: $f = 0,705$. Para

Papadakis: $f = 1,12$.

Eso quiere decir que podríamos saber el valor de la ET mm día en un cultivo de tomate en plena producción, y por lo tanto calcular el valor de k , multiplicando por un factor de corrección los valores de ET potencial calculados según fórmulas meteorológicas.

Esos factores de corrección dependerán del período considerado, es decir, del intervalo entre dos riegos. Los que hemos calculado anteriormente son válidos para los 35 días que van desde el 2 de febrero al 9 de marzo, duración de la experiencia. Si se hubiera regado antes, supongamos el 12 de febrero, hasta ese día la curva de ET hubiera sido la misma, por lo que no hubiera variado el coeficiente de extinción k , pero como los valores de ET potencial serían mayores, por lo menos los calculados según THORNWAITE y BLANEY & CRIDDLE, los f respectivos también variarían.

2° EVAPORACIÓN

De los resultados obtenidos se puede deducir que la evaporación, en las condiciones de sombreado por la presencia del cultivo, sigue las mismas leyes generales que la ET y le es aplicable la

ecuación general (1).

En la ecuación (2), que es la específica para el ensayo y derivada de los datos experimentales obtenidos, el coeficiente de extinción k es lógicamente menor que en el caso de la ET, lo que indica: una menor velocidad inicial y una más lenta disminución de la misma a través del tiempo.

De los datos consignados en el cuadro 5, representados gráficamente en la figura 4, se desprende que la relación existente entre las velocidades relativas de evaporación y las humedades relativas -- disponible y total- del suelo es exactamente la misma que para la ET y que los puntos respectivos están contenidos en las mismas rectas.

Esto demostraría que, básicamente, la E y la T son esencialmente un mismo tipo de fenómeno físico y sufren por igual la influencia del potencial hídrico sobre su intensidad.

Para encontrar el valor de k en la ecuación de evaporación se pueden seguir los mismos procedimientos mencionados para el k de ET.

En el caso del empleo de fórmulas meteorológicas para la determinación de la velocidad inicial de evaporación, E mm/día, los factores f serán: 0.49, 0.29 y 0.46 para las fórmulas de THORNWAITE, BLANEY & CRIDDLE y PAPADAKIS, respectivamente.

Es muy posible que la evaporación observada en nuestro ensayo sea distinta que la que hubiera tenido lugar en terrenos desnudos: el sombreado del cultivo, aunque disminuye la velocidad inicial, también hace menos marcada la aceleración negativa a través del tiempo. Eso habría que probarlo en otra serie de experiencias.

3? TRANSPIRACIÓN

Aunque en estas experiencias no se midió directamente la transpiración, el planteo del ensayo fue encaminado justamente a posibilitar su cálculo a través del conocimiento de los factores que gobiernan el fenómeno conjunto de ET y el de E y, por diferencia, deducir los valores de T.

Para cada momento determinado la ET puede considerarse como sumatoria de $E + T$; por lo tanto $(ET) - E = T$.

El problema consiste en asignar el valor de E en el complejo $E + T$.

La dependencia del valor de E de la humedad presente en el suelo, hace que sea erróneo el criterio de simplemente restar, para un día determinado, de la ET la E determinada en las parcelas sin cultivo.

Nosotros hemos empleado el siguiente procedimiento:

Como la disminución relativa de velocidad de ET y E con el descenso de la humedad del suelo tienen los mismos valores para ambos fenómenos, quiere decir que la T también está influida de idéntica- manera. Por lo tanto, si se multiplica la diferencia inicial

$ET = E$, por el contenido hídrico relativo en el día t se obtendrá la velocidad de T en ese día.

RESUMEN Y CONCLUSIONES

En un cultivo de tomate Roma, realizado *en* suelo franco de la localidad de Chacras de Coria, Mendoza, tutorado y *en* plena producción (febrero), se establecieron parcelas de dos tipos: (I) se dejó el cultivo sin modificaciones; (II) se cortaron los tallos de las plantas pocos mm por debajo de la superficie del suelo y se cubrió el corte con tierra.

Las plantas quedaron atadas a las cañas: de esta manera se interrumpió la transpiración (T) y se intentó conservar la influencia física del cultivo sobre el proceso de evaporación.

Ambos tratamientos fueron sometidos a un riego en exceso, para lograr Capacidad del Campo ($w = 21,5\%$), y no volvieron a regarse hasta que (I) llegara a capacidad de 15 bares de succión matriz ($w = 10\%$). Las parcelas se mantuvieron libres de malezas las que fueron arrancadas sin modificar la superficie del suelo) y (II) se cosechó semanalmente.

La evolución de la humedad edáfica se siguió mediante muestreos cada 3 días y determinación a estufa.

La pérdida de agua en la capa 0-60 cm de las parcelas (I) fue considerada como evapotranspiración (ET) y las de (II) como evaporación (E).

Del análisis de los resultados se concluyó:

- 19 Que E y T pueden ser expresadas por el mismo tipo general de ecuación que para la velocidad de ET . T o E , en función del tiempo, o sea:

$$w = w_0 - k \cdot t$$

donde t , días a partir del riego, y k constante de extinción posible de ser encontrada experimentalmente, conociendo el contenido hídrico en un día cualquiera después del riego.

- 29 Que la velocidad relativa de E y T siendo 100 la velocidad de E y T enseguida después del riego es una función lineal del contenido hídrico relativo del suelo.
- 39 Que conociendo los valores de k para ET y E correspondientes a un determinado complejo ecológico, pueden establecerse las ecuaciones para predecir: humedad edáfica; velocidad y cantidad acumulada, absoluta y relativa, de ET , E y T en un día t .

LITERATURA CITADA

- BLAEY, H. F. y W. D. CRIDIE. (1950). *Determining water requerimets in irrigated reas from climatological and irrigation elata*. U. S. Dep. of Agr. Soil Cous. Serv. Tech. Paper 96. vWashington, D. C. U. S. A.
- GRASSI, C. J. (0963). *Measrements of evapotranspiration in saffloer*. (Inédito). Problema especial, College of Engineering, Utah Sta te University, Logan, Utah. U. S. A.
- KUIPER, P. J. C. y J. F. BIRUIZEN (1959) *The effects some environmental factora on //,e transpiration of plants nder controlled condit.-ions*. Jnst, Lalld Water Manag. Reserch Tech. Bull. Wageningen. The Netherln.mls.
- NLJNSOHN, L., C. J. GRASSI D. MIAJLOICH (1965). *Respuesta de la vid a rlifer,mtcs rngüíenes de l'iego*. (Inédito). Instintno de Suelos y Riego, Facnlta, l de Cienci:ts Agrmrias, i\leniloza, Argeutina.
- PAPAIJAKS, J. (1962). *Avances recientes en el cstudfo hfrlrlico i/e los climas*. Idia. N 175, Bnenos Aires.
- TnoR:o;nI WAJT1., \V. C. (1948). *A n pproach toard a rational classificatfo11 of climate*. Tlnr Geographical Review 38 : 55-94.
- VILLAIWSON, L. ii. í1963). *Separation of evapotranspirntion an deep percolalion . . . Jonr. Irrig, Dminage Div, Proc. Amer. Soc. Civil Eng. 89(3): 77-88.*