

EVAPORACION DE AGUA EN SUELOS DE DISTINTA TEXTURA

F. INGELMO SÁNCHEZ*
S. CUADRADO SÁNCHEZ*
A. BLANCO DE PABLOS*

SUMMARY: In this work, the study of the water evaporation from soils samples was made and their results compared with the evaporating demand from the free water and Piche's evaporimeter. The following three phases were carried out: laboratory, greenhouse and natural conditions, and the water from *soils of different textural classes* was recorded. All these results was compared with the data deduced from the Penman's and Turc's formulæ.

RESUMEN: Dada la importancia del conocimiento de la evaporación en función de la textura del suelo para la generalización del balance hídrico, dentro de cada tipo textural, se aborda el estudio de la evaporación de diversas muestras de suelos, y se la compara con la demanda evaporante (agua libre y evaporímetro Piche).

El trabajo comprende tres fases: invernadero, laboratorio y condiciones naturales en recinto alambrado. En los tres casos se midieron gravimétricamente las pérdidas de agua de muestras de suelos de distinta textura, muy contrastados en cuanto a capacidad de retención de agua.

Los resultados fueron comparados con los datos de evaporación obtenidos por las fórmulas de Penman y de Turc.

INTRODUCCIÓN

La *textura* del suelo constituye con frecuencia punto de partida de numerosas investigaciones, debido a que de ella están dependiendo otra serie

* Centro de Edafología y Biología Aplicada. Salamanca. C.S.I.C.

de propiedades importantes del suelo. En concreto figuran en la bibliografía estudios sobre diversos aspectos *hídricos* del suelo, como retención, infiltración, conductividad y cesibilidad de agua, etc., en los que la *textura* es un factor decisivo o muy importante.

De la relación de la *textura* con otras propiedades del suelo se puede deducir asimismo una *interdependencia entre el fenómeno de la evaporación y la textura misma*, en cuanto a que ésta condiciona el aporte de agua a la superficie evaporante (RAFI, 1964; ASLYNG, 1965; BLANG et al., 1967; ABICHANDANI et al., 1967; FULTON, 1968; PENMAN, 1968; SERMER, 1968; ADAMS et al., 1969; BLANCK, et al., 1969; NORERO, 1969; GARDNER et al., 1970; GILL, 1977; EAGLESON, 1978, entre otros).

Son pocos los estudios experimentales que aborden la relación directa *textura - evaporación*. Quizás los que más directamente traten el tema sean los trabajos de ALIZAI et al. (1970) y de WILCOX (1967).

Teniendo en cuenta la importancia del conocimiento de la evaporación en función de la textura de los suelos, para la generalización del *balance hídrico*, dentro de cada tipo de textura, hemos abordado este estudio.

El objeto de nuestro trabajo es la medida de las pérdidas de agua por evaporación de suelos característicos de la Provincia de Salamanca, diferentes en cuanto a su textura. Con el estudio, que abarca distintas *etapas experimentales*, pretendemos caracterizar los suelos en relación con su *balance hídrico*, dentro de una temática constante de investigación (CUADRADO et al., 1977), para determinar sus posibilidades intrínsecas de consumo de agua, de interés especial dado el tipo de clima de la provincia (GARMENDIA, 1964).

Finalmente, entra dentro de nuestro objetivo la comparación de los datos de evaporación obtenidos, con los correspondientes desde superficies de agua libre, así como con los calculados mediante fórmulas que utilizan datos climáticos.

MATERIAL Y MÉTODOS

Hemos elegido cuatro suelos de la provincia de Salamanca dedicados con preferencia al cultivo de cereales.

Características físicas de los suelos

Los caracteres texturales de los suelos, todos con porcentaje de materia orgánica inferior a uno y escaso contenido en CO_3Ca , así como su procedencia, figuran en la tabla 1.

TABLA 1. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE LOS SUELOS. DATOS DEL ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO, DE LA DENSIDAD REAL Y DE LA DENSIDAD APARENTE

PROCEDENCIA	ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO, %					DENSIDADES		Nombre abreviado de la Textura	
	Arcilla 2 μ m.	Limos		Arenas		Real	Aparente		
		fino 20 μ m.	grueso 50 μ m.	fina 200 μ m.	gruesa 2000 μ m.	g. cm ⁻³			
(A). Arabayona	2,5	1,5	—	36,0	57,0	2,68	1,47	Arenoso	
(B). Babilafuente	13,5	9,0	—	33,5	41,0	2,67	1,47	Arenoarcilloso	
(C). Las Veguillas	11,0	28,0	17,5	25,5	15,5	2,79	1,53	Limoso	
(D). El Pedroso (La Armuña)	28,5	5,0	10,0	30,5	23,0	2,56	1,41	Arcilloso	
(E)	Suelo (B) + 23 % gravas (2-3 mm)					2,66	1,46	Arenoarcilloso con gravas	
(F)	MEZCLAS	Suelo (A) + Suelo (D) (1:1)					2,61	1,44	Arenoso + arcilloso
(G)		Suelo (A) + sobre suelo (D) (2 cap.)					2,61	1,44	Arenoso/Arcilloso

Dap = Densidad aparente. $D_p = (1 - p) \cdot D_r$
 Dr = Densidad real. p = porosidad inicial (45 %)

Al objeto de obtener una más amplia gama de textura, se han manipulado los suelos de forma que las muestras utilizadas, tamizadas por malla de 2 mm., han sido las que, de forma simplificada, se exponen en la tabla 1.

El dato de *densidad real* se obtuvo por la técnica de picnómetro de Beckman, empleando vacío para la remoción del aire. El dato de la *densidad aparente* fue calculado a partir del dato anterior y teniendo en cuenta la *porosidad* inicial (fijada por convenio en un 45 %), mediante la fórmula:

$$d_a = (1 - \text{porosidad}) D_r$$

Para la determinación de las *características de retención de humedad* de las muestras se utilizó el equipo de la cámara de presión de RICHARDS (1949). En el análisis granulométrico se ha utilizado el método de la pipeta para las fracciones finas.

En la figura 1, la representación de los valores de pF frente a los porcentajes de agua retenida, referidos a suelo seco, indican la amplia gama de capacidad de retención de las muestras de suelos.

Niveles experimentales

En todos los casos la evaporación de las muestras de suelos se midió por control gravimétrico. El trabajo comprende tres etapas o niveles experi-

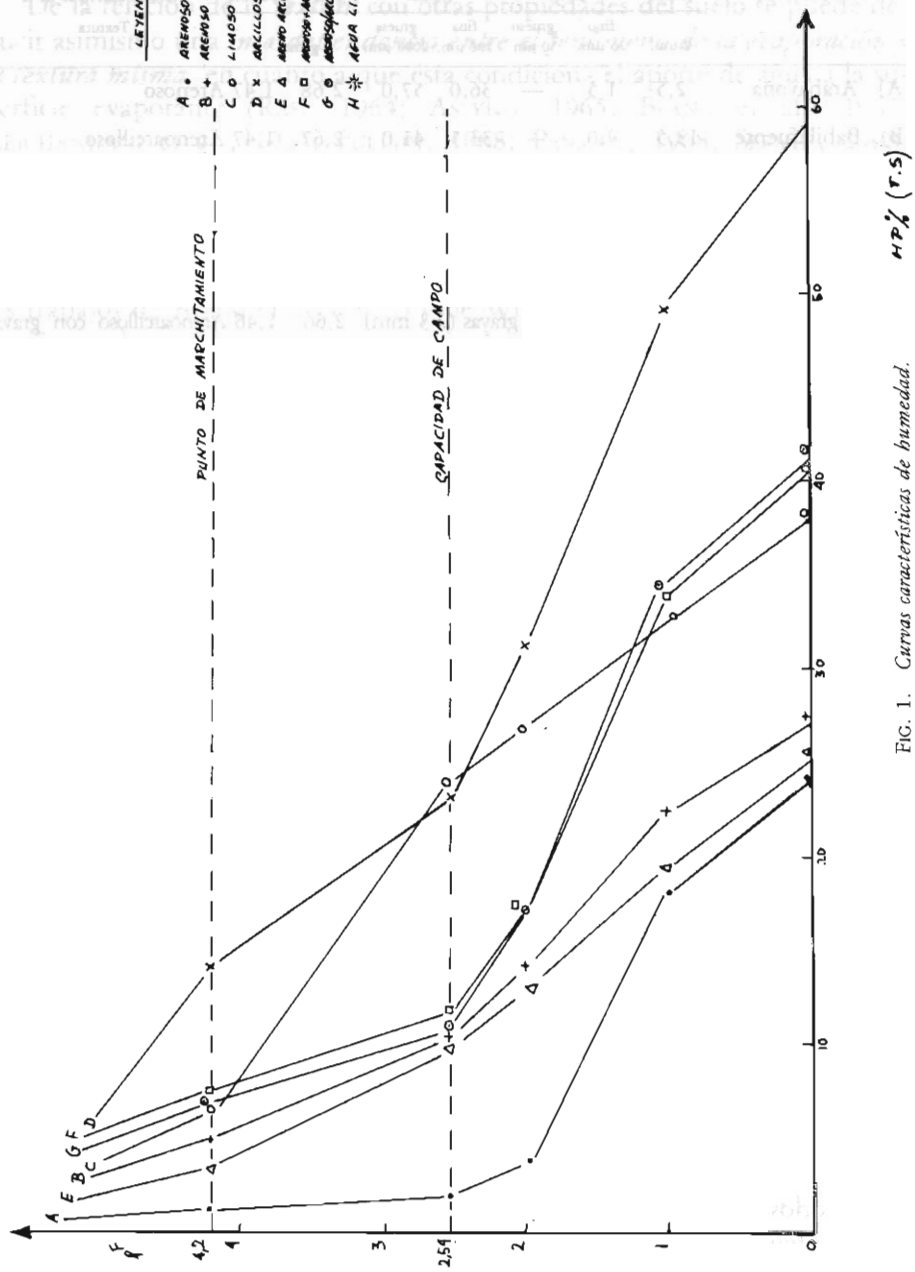


FIG. 1. Curvas características de humedad.

mentales: invernadero, laboratorio y condiciones naturales en recinto alambrado.

En las etapas de invernadero y laboratorio las muestras de suelos se dispusieron en platos de plástico (de 18 cm. de diámetro por 2,4 cm. de altura), cuatro platos por muestra, en los que tanto el peso como el volumen y la superficie evaporante, sensiblemente iguales para todos, fueron calibrados de forma que la porosidad resultante de las muestras fuera de 45 %. El drenaje se facilitó por medio de orificios, iguales en número y disposición, en el fondo de cada plato, que fue luego cubierto con papel de filtro, para evitar pérdidas de la muestra. Se dispuso también de cuatro platos con un volumen de agua permutada, igual al de las muestras de suelos, para el control de las pérdidas de agua por evaporación desde la superficie de agua libre. Estas pérdidas fueron también determinadas gravimétricamente.

La técnica de preparación y humectación de los suelos consistió en añadir el peso calculado de muestra en capas sucesivas hasta lograr una altura de 2 cm., consiguiendo así la porosidad convenida. Las muestras fueron luego humectadas, con agua permutada, por imbibición capilar durante 24 horas, permitiendo después el drenaje libre durante 15 minutos, durante los cuales se procuró evitar la evaporación cubriendo las muestras y realizando todas las operaciones en recinto frío ($\approx 10^{\circ}\text{C}$). De esta forma la humedad inicial de los suelos corresponde a $pF = 1$ (fig. 1).

En el recinto alambrado de C.E.B.A.S., el trabajo se realizó en condiciones naturales, controlando las condiciones climáticas mediante los datos de la estación del S.M.N. del Centro. Se realizaron dos tipos de experiencias: con platos y con macetas.

Las experiencias con platos se realizaron de igual forma que las del invernadero, sin embargo debido a las fuertes condiciones atmosféricas (20 de junio a 6 de julio de 1979) fue preciso rehumectar los suelos diariamente.

En el caso de las macetas (de 20 cm. de diámetro y 18 cm. de altura) la técnica de llenado y humectación se efectuó de forma simultánea y progresiva. Se fueron añadiendo capas sucesivas de suelo de 2 cm. de altura y el agua de saturación correspondiente, hasta conseguir la porosidad convenida (45 %). Las muestras se dejaron de la forma ya referida, para permitir el drenaje evitando la evaporación, durante 48 horas. El agua retenida por los suelos queda también en este caso a pF próximo a 1.

Para el establecimiento de los sucesivos perfiles hídricos durante el proceso de desecación se utilizó, para la toma de muestras, un tubo sonda biselado de 2 cm. de diámetro interno y 18 cm. de profundidad. Con las debidas precauciones para evitar la evaporación, muestras de 2 cm. de al-

tura fueron pesadas y desecadas luego en la estufa a 105 °C para determinar su humedad. La cantidad de suelo extraída en cada toma fue posteriormente repuesta añadiendo el peso de agua que tenía en el momento de la toma. Las macetas fueron dejadas, con las precauciones indicadas, durante 24 horas, para permitir la distribución de la humedad.

El conocimiento de las características indicadas permite saber: a qué rango de pF corresponde la humedad inicial del suelo; cuándo es necesario rehumectar los suelos para que su humedad no descienda de un valor determinado de pF; y dentro de qué margen de pF se encuentran los suelos diariamente.

Las condiciones climáticas fueron referidas a los datos diarios de temperatura máxima, mínima y media; mientras que para la *demanda evaporante* se hizo uso del evaporímetro Piche en el invernadero, y de los datos de evaporación de agua libre en el laboratorio.

Se ha procurado, por tanto, que el *fenómeno de la evaporación* dependa de dos variables, *la demanda evaporante* y *la composición textural*, ya que fueron fijadas las demás posibles variantes: porosidad, humedad inicial, estructura (suelo tamizado), y superficie evaporante; obteniéndose un dato de evaporación media de las cuatro repeticiones.

Fórmulas de cálculo de evaporación

Se han utilizado las de PENMAN (1964) y TURC (1961) con los datos de radiación global del observatorio del S.M.N. de Matacán, y los de temperatura, Piche, humedad relativa del aire del S.M.N. del Centro, de la forma que indicaremos en el apartado de resultados.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

ETAPA PREVIA: INVERNADERO

Del análisis de los datos de la tabla 2 se deduce que, para una misma demanda evaporante (Piche):

— las pérdidas de agua acumuladas varían notablemente, según los tipos texturales, siendo mayor cuanto más fina es la textura, según la ordenación decreciente: D, C, F, B, A, G, E.

— la evaporación del suelo areno-arcilloso (B) es superior en 1,33 mm., al final del ciclo, a la del areno-arcilloso con gravas (E), deduciéndose de ello la influencia de la reserva inicial de la muestra.

Tabla 2. RESULTADOS OBTENIDOS EN LA ETAPA DE INVERNADERO

DIAS	T máx.	T mín.	T. med. (°C)	Evaporación acumulada, en mm.											Evapor. (mm.)	PICHE
				A	B	C	D	E	F	G	H	AGUA				
1	23,0	4,0	13,5	0,75	0,81	0,91	1,15	0,78	0,85	0,91	0,70	0,85	Datos de las pérdidas de agua			
2	18,5	1,5	10,0	2,19	2,31	2,62	3,23	2,22	2,39	2,38	1,92	1,40	por evaporación, en mm. acu-			
3	33,0	1,5	15,0	3,75	3,93	4,41	5,52	3,78	4,11	3,97	3,37	2,90	mulados para los suelos, el agua			
5	26,0	4,0	15,0	6,92	7,13	7,80	9,78	6,77	7,35	7,12	6,41	5,40	libre y el evaporímetro Piche.			
8	26,1	-3,5	11,3	12,13	12,78	14,33	18,96	11,45	13,62	11,62	11,93	10,70	Datos de las temperaturas.			
				0,81	0,69	0,61	0,46	0,85	0,54	0,58	Datos de evaporación acumu-					
E (mm.) · 100				2,35	1,96	1,66	1,30	2,42	1,52	1,52	lada referida a la cantidad de					
Agua inicial (gr.)				4,03	3,33	2,80	2,23	4,12	2,62	2,54	agua retenida inicialmente a					
				7,38	6,20	5,20	3,94	7,40	4,83	4,67	un mismo pF, en gr.					
				12,9	11,4	9,95	7,34	13,1	9,15	7,86	Relación de evaporación de					
E (mm.)				1,13	1,19	1,34	1,70	1,07	1,27	1,08	1,11	agua acumulada al final de la				
E/Piche (mm.)												1,00	experiencia con el mismo dato			
													para el evaporímetro Piche.			

— la evaporación acumulada del suelo arenoso-arcilloso al 50 % (F) es 2 mm. mayor que la de la muestra arenosa/arcillosa (dos capas) (G), aun siendo iguales las reservas de agua iniciales. Esta economía de agua se explica por el hecho de que en el primer caso la arena está homogéneamente repartida, mientras que en el segundo se encuentra en la parte superior sobre la capa de arcilla.

— la evaporación es inferior a la del agua libre, sólo en los casos de los suelos areno-arcillosos con gravas (E) y arenoso/arcilloso (G), a causa, respectivamente, de que la muestra de gravas es la de menor reserva de agua inicial, y del efecto «protector» de la capa arenosa en el segundo caso.

— al referir el dato de evaporación al contenido inicial de agua, se establece la ordenación de los suelos de más a menos: E, A, B, C, F, G y D, observándose también la diferencia entre las muestras F y G.

En esta etapa de invernadero, a medida que las muestras se desecaban, aparecían problemas de homogeneidad (grietas) debidos a la gran diferencia entre la temperatura máxima y la mínima. La desecación por otra parte era demasiado rápida, debido a la gran acumulación de calor en el interior del invernadero, no pudiendo estudiarse bien el fenómeno de la evaporación al tener que rehumectar las muestras en períodos de tiempo muy cortos e irregulares. Por estas razones la experiencia, en condiciones tan alejadas de las naturales, es considerada como ensayo previo.

SEGUNDA ETAPA: LABORATORIO

En esta etapa las condiciones han sido más homogéneas y suaves. Los datos de temperatura y de evaporación de agua libre (adoptada como medida de la demanda evaporante) se muestran en la tabla 3, en la que las dos últimas columnas contienen los *valores medios* para cada ciclo.

En la figura 2 se representan las pérdidas por evaporación (mm.) acumuladas para cada suelo y para el agua libre frente al tiempo en días. Las gráficas muestran una mayor evaporación para los suelos de textura más fina, manteniéndose la misma secuencia de suelos de la etapa anterior, es decir, desde el suelo arcilloso (D) al de gravas (E), con una diferencia de 14 mm. entre aquél y el arenoso.

Para la interpretación correcta de estos resultados es preciso tener en cuenta las cantidades de agua retenidas inicialmente por cada muestra de suelo, inherentes a su tipo textural, por ejemplo entre el suelo areno-arcilloso y la misma muestra con gravas hay una diferencia de 21 mm.

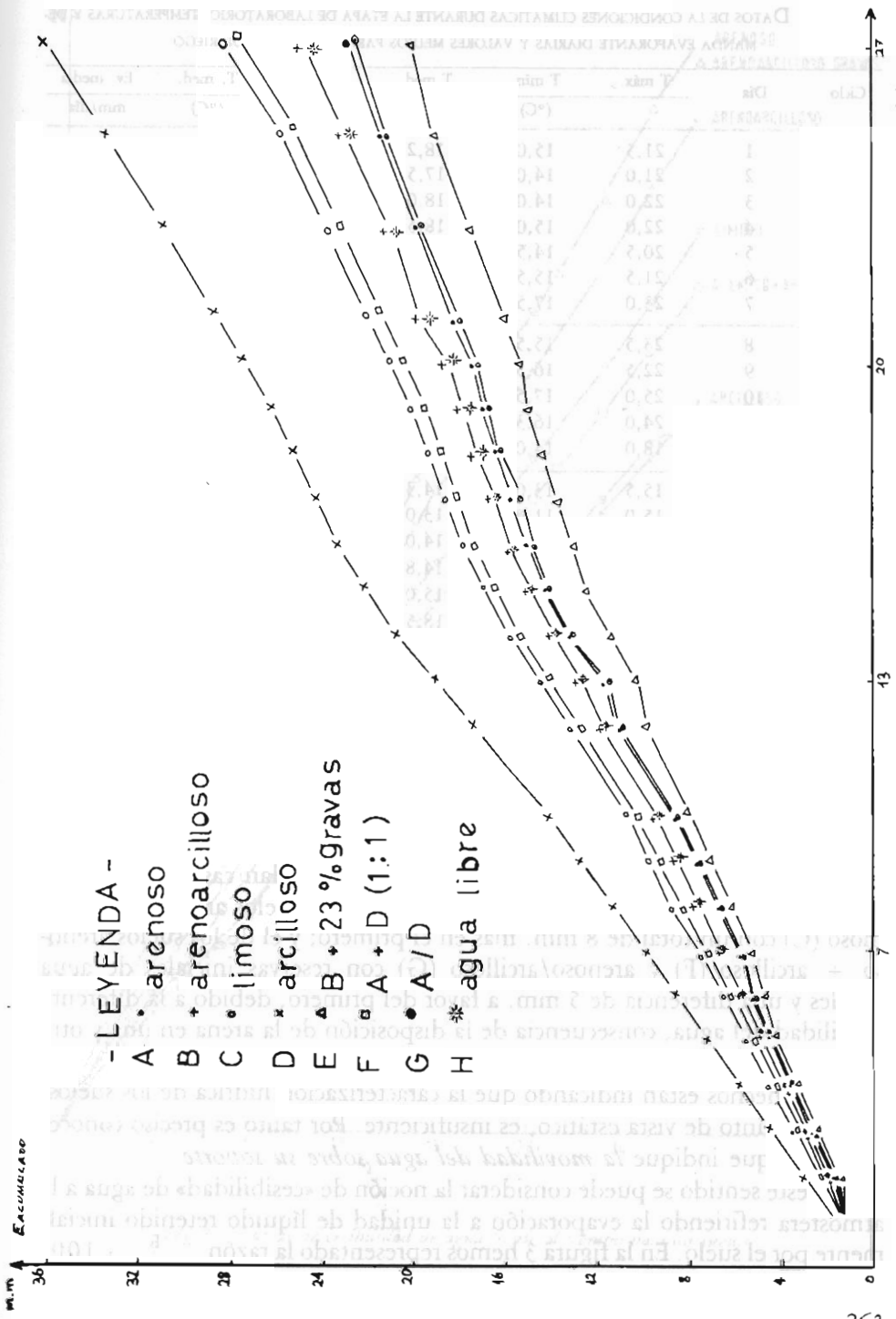


FIG. 2. Evaporación de agua acumulada, expresada en mm. frente al tiempo en días para los suelos, y para el agua libre durante la etapa de laboratorio

TABLA 3. DATOS DE LA CONDICIONES CLIMÁTICAS DURANTE LA ETAPA DE LABORATORIO: TEMPERATURAS Y DEMANDA EVAPORANTE DIARIAS Y VALORES MEDIOS PARA CADA CICLO DE RIEGO

Ciclo	Día	T máx.	T mín.	T med.	Ev.	T. med.	Ev. media
		(°C)			mm/día	(°C)	mm/día
I	1	21,5	15,0	18,2	1,05		
	2	21,0	14,0	17,5	0,97		
	3	22,0	14,0	18,0	1,02		
	4	22,0	15,0	18,5	0,94		
	5	20,5	14,5	17,5	0,94		
	6	21,5	15,5	18,5	0,90		
	7	23,0	17,5	20,2	0,90	18,2	0,97
II	8	23,5	15,5	19,5	0,93		
	9	22,5	16,5	19,5	0,93		
	10	25,0	17,5	21,5	0,90		
	12	24,0	16,3	20,2	1,03		
	13	18,0	14,0	16,0	1,10	19,3	0,98
III	14	15,5	13,0	14,3	1,14		
	15	15,0	11,0	13,0	1,04		
	16	17,0	11,0	14,0	0,93		
	17	18,0	11,5	14,8	0,70		
	18	18,0	12,0	15,0	0,68		
	19	21,0	16,0	18,5	0,73		
IV	20	22,0	14,0	18,0	0,85	15,4	0,86
	21	22,0	11,0	16,5	0,88		
	23	22,3	13,7	18,0	0,84		
	25	20,0	15,5	17,3	0,89		
	27	19,5	14,0	16,8	1,00	17,2	0,90

Sin embargo para reservas iniciales semejantes se dan casos de pérdidas por evaporación bien diferentes. Tal es el caso de los suelos arcilloso (D) y limoso (C) con un total de 8 mm. más en el primero; y el de los suelos arenoso + arcilloso (F) y arenoso/arcilloso (G) con reservas iniciales de agua iguales y una diferencia de 5 mm. a favor del primero, debido a la diferente movilidad del agua, consecuencia de la disposición de la arena en una y otra muestra.

Estos hechos están indicando que la caracterización hídrica de los suelos, desde el punto de vista estático, es insuficiente. Por tanto es preciso conocer otro dato que indique *la movilidad del agua sobre su soporte*.

En este sentido se puede considerar la noción de «cesibilidad» de agua a la atmósfera refiriendo la evaporación a la unidad de líquido retenido inicialmente por el suelo. En la figura 3 hemos representado la razón $\frac{E}{\text{agua inicial}} \cdot 100$,

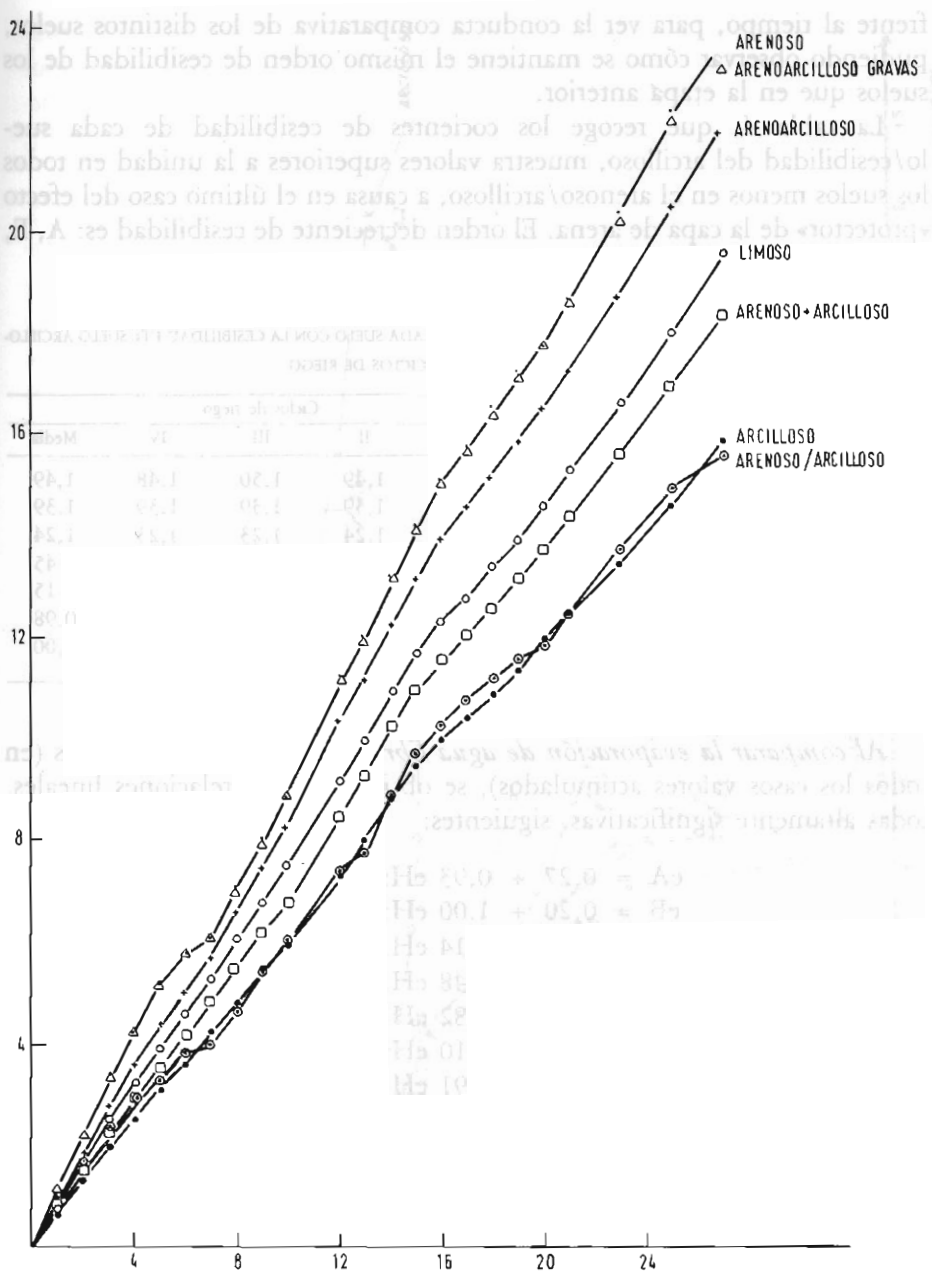


FIG. 3. Curvas de cesibilidad de agua frente al tiempo para los suelos

frente al tiempo, para ver la conducta comparativa de los distintos suelos, pudiendo observar cómo se mantiene el mismo orden de cesibilidad de los suelos que en la etapa anterior.

La tabla 4, que recoge los cocientes de cesibilidad de cada suelo/cesibilidad del arcilloso, muestra valores superiores a la unidad en todos los suelos menos en el arenoso/arcilloso, a causa en el último caso del efecto «protector» de la capa de arena. El orden decreciente de cesibilidad es: A, E, B, C, F, D y G.

TABLA 4. COMPARACIÓN DE LA CESIBILIDAD DE AGUA DE CADA SUELO CON LA CESIBILIDAD DEL SUELO ARCILLOSO DURANTE LOS CUATRO CICLOS DE RIEGO

Cesibilidad del suelo Cesibilidad del suelo arcilloso	Ciclos de riego				Media
	I	II	III	IV	
Suelo arenoso	1,47	1,49	1,50	1,48	1,49
Suelo arenoarcilloso	1,37	1,39	1,39	1,39	1,39
Suelo limoso	1,27	1,24	1,23	1,23	1,24
Suelo arenoarcilloso con gravas	1,42	1,46	1,47	1,46	1,45
Suelo arenoso + arcilloso (1:1)	1,14	1,15	1,16	1,15	1,15
Suelo arenoso sobre arcilloso	0,95	0,97	0,99	0,99	0,98
Suelo arcilloso (testigo)	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00

Al comparar la evaporación de agua libre (eH) con la de los suelos (en todos los casos valores acumulados), se obtienen las correlaciones lineales, todas altamente significativas, siguientes:

$$eA = 0,27 + 0,93 eH; \quad r = 0,999$$

$$eB = 0,20 + 1,00 eH; \quad r = 0,999$$

$$eC = 0,05 + 1,14 eH; \quad r = 0,999$$

$$eD = 0,21 + 1,48 eH; \quad r = 0,999$$

$$eE = 0,31 + 0,82 eH; \quad r = 0,999$$

$$eF = 0,23 + 1,10 eH; \quad r = 0,998$$

$$eG = 0,51 + 0,91 eH; \quad r = 0,992$$

destacando la concordancia con el agua libre en el caso del suelo arenoarcilloso (B).

Las correlaciones múltiples, que hacen depender la evaporación diaria de cada suelo de la *temperatura media diaria* y de la *demanda evaporante* (altamente significativas para los suelos B, C, D y F; significativas para el A y G; y poco significativas en el caso del suelo eE, indican que la influencia de la *temperatura media* es despreciable frente a la de la *demanda evaporante*, ya que esta última variable incluye la temperatura.

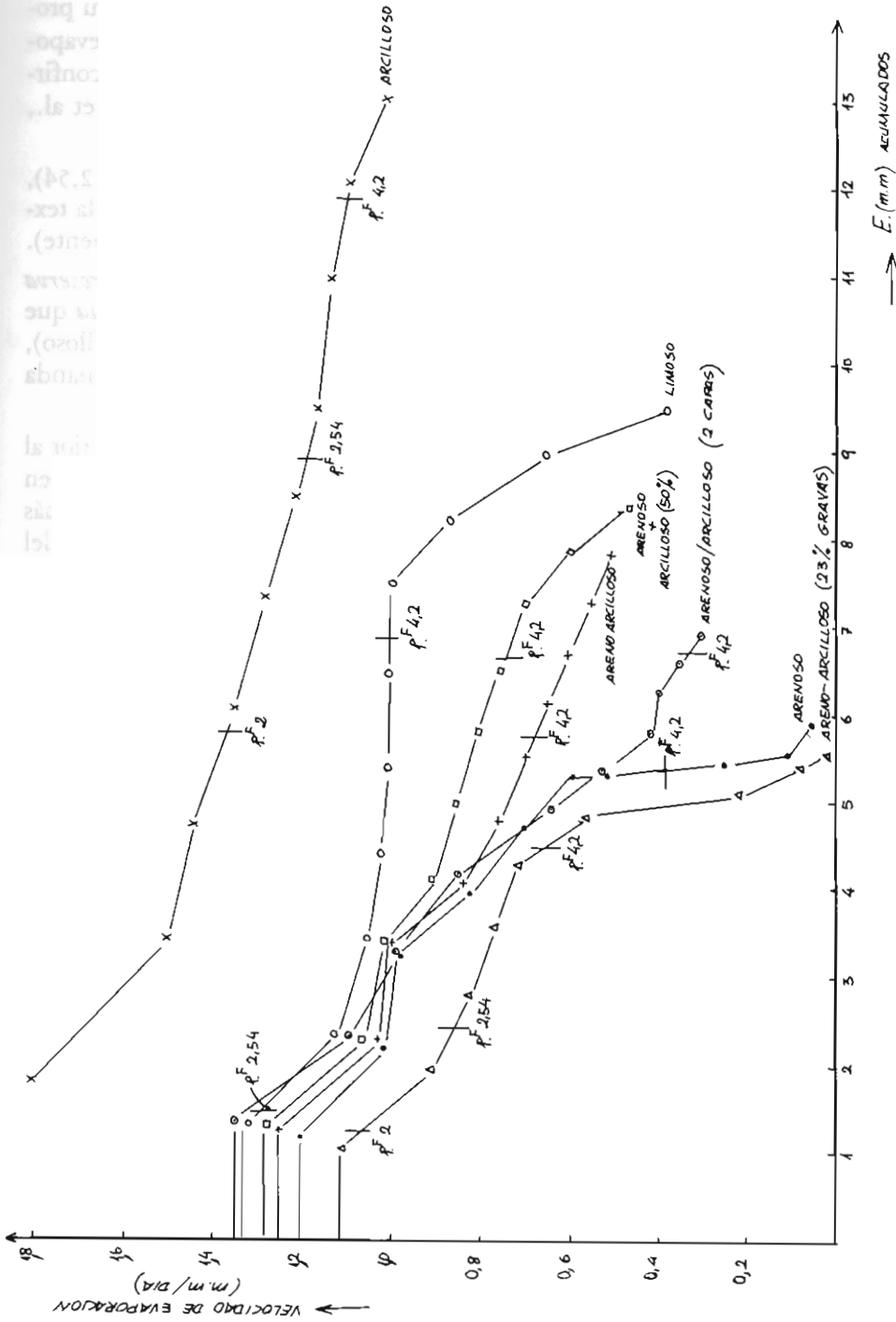


FIG. 4. Ritmo de evaporación en el proceso de desecación de los suelos bajo una demanda evaporante constante ($1 \pm 0,3$ mm/día)

Finalmente, en cuanto al *ritmo de evaporación* de los suelos, en su proceso de desecación, en la figura 4 se representa la velocidad diaria de evaporación frente a la evaporación acumulada. El análisis de estas gráficas confirma la existencia de tres estadios (FEODOROF, 1965; citado por Hénin et al., 1972).

— Un primer estadio, que corresponde a suelo saturado (pF 1 - 2,54), con *velocidades de evaporación* tanto más elevadas cuanto más fina es la textura (1,8 y 1,1 para los suelos D y E, arcilloso y de gravas respectivamente).

— en el segundo estadio, el grado de saturación corresponde a la *reserva de agua* (pF 2,54 - 4,2) y los suelos se desecan a una *velocidad media* que desciende gradualmente. En esta fase sólo los suelos C (limo) y D (arcilloso), mantienen velocidades de evaporación superiores al valor de la demanda evaporante, en concordancia con su mayor reserva inicial de agua.

— el estadio final corresponde a un grado de humedad inicial inferior al valor del *punto de marchitamiento*, siendo la *velocidad de evaporación* en todos los casos inferior a la demanda evaporante, tanto más cuanto más gruesa es la textura o más impedido está el movimiento ascensional del agua.

TERCERA ETAPA: CONDICIONES NATURALES EN RECINTO ALAMBRADO

El estudio de las respuestas de los suelos a la demanda climática, en condiciones naturales *en recinto alambrado*, comprende dos series de medidas: con platos y con macetas.

Experiencias con platos

Las condiciones climáticas durante el tiempo de esta etapa se indican en la tabla 5.

La figura 5 da cuenta de los resultados comparativos.

Se aprecia cómo las fluctuaciones de la demanda climática se ponen de manifiesto por el cambio de la pendiente de las distintas curvas.

Se constata que también en estas condiciones de demanda evaporante significativamente mayor que la etapa anterior, la evaporación de los suelos y del agua libre sigue las mismas modalidades, esto es:

— para un mismo lapso de tiempo, ceden más agua y son los de mayor gasto diario los suelos de textura más fina. Los otros agotan rápidamente su reserva, bajo las fuertes condiciones de desecación, con el consiguiente descenso de la velocidad de evaporación. Ocupan posiciones intermedias los

TABLA 5. DATOS METEOROLÓGICOS DURANTE LA EXPERIENCIA CON PLATOS EN CONDICIONES CLIMÁTICAS NATURALES EN RECINTO ALAMBRADO. TEMPERATURAS, HUMEDAD RELATIVA DEL AIRE, RADIACIÓN GLOBAL, DEMANDA EVAPORANTE DE LA ATMÓSFERA (PICHE), DATOS DE LA EVAPORACIÓN DIARIA PARA LOS SUELOS Y EL AGUA LIBRE

Días	T. máx.		T. med.	Hr humedad relativa %	Q radiac. global Cal. cm ² día	Evaporación diaria en mm.									
	T. mín.					S u c l o s									
	(°C)		A	B	C	D	E	F	G	H	Agua	Piche			
1	31,0	11,0	21,0	23,0	622,4	5,73	6,44	9,23	12,50	5,13	8,99	6,22	7,38	8,10	
2	30,5	13,0	21,7	29,5	765,4	5,60	6,14	8,99	11,50	5,04	7,83	5,95	8,10	4,40	
3	30,5	12,5	21,5	46,5	529,9	5,51	6,05	8,63	11,30	5,03	7,95	5,51	7,34	3,60	
4	27,5	13,0	20,2	33,0	618,2	5,75	5,80	7,85	10,30	4,98	7,25	5,39	5,92	4,00	
5	22,5	7,4	15,0	26,5	770,6	5,51	6,13	7,78	9,70	4,92	7,21	5,31	5,82	6,50	
6	27,5	10,0	18,8	28,0	741,5	5,69	6,13	7,74	10,30	5,21	7,61	5,48	6,31	7,70	

suelos que, por su tipo textural, poseen reservas iniciales medias de agua, o tienen el movimiento de agua impedido hacia la superficie, caso del suelo G (arenoso/arcilloso).

— el *orden decreciente* de las evaporaciones acumuladas es el siguiente: suelo arcilloso (D), limoso (C), areno + arcilloso (1:1) (F), agua libre (H), areno-arcilloso (B), evaporímetro Piche, arenoso/arcilloso (2 capas) (G), arenoso (A) y arenoarcilloso con gravas (E); igual por tanto al de las dos etapas anteriores.

— de nuevo hay diferencia en el ritmo de evaporación y en la evaporación acumulada de los suelos F y G según que los componentes (arena y arcilla) estén mezclados o en capas sucesivas.

— finalmente, existe una diferencia clara al final entre la evaporación del agua libre y la del suelo areno-arcilloso, que en este caso concuerda mejor con los valores del evaporímetro Piche (2 mm. de diferencia, tabla 5).

La comparación de los gastos diarios (mm/día) de los suelos, el agua libre y el evaporímetro Piche (tabla 5), indica que los suelos siguen regular-

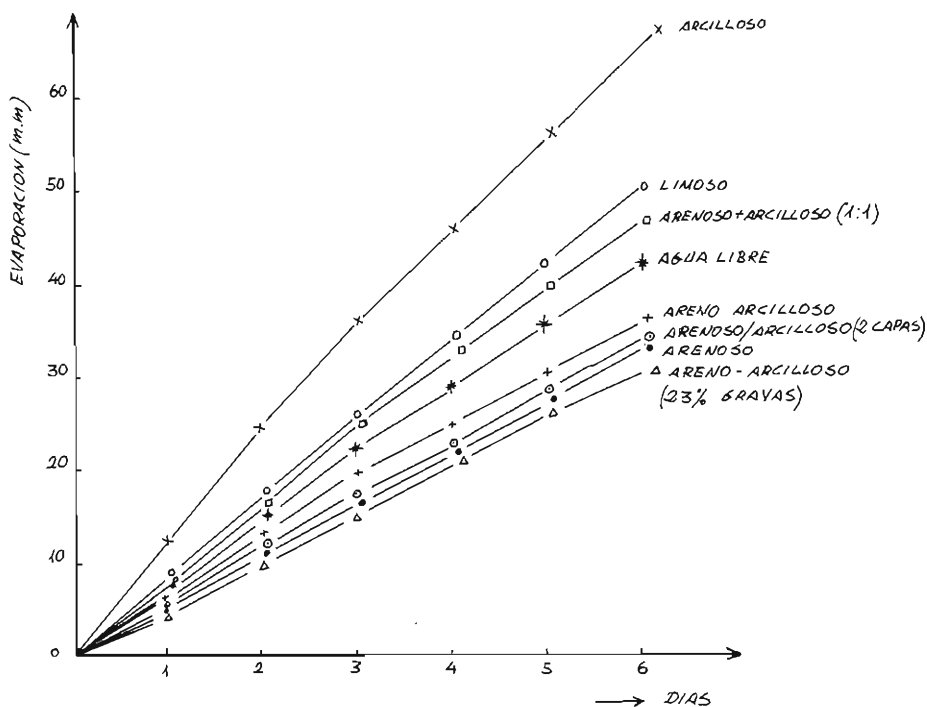


FIG. 5. Evaporación de agua acumulada expresada en mm. frente al tiempo en días, para los suelos, en condiciones climáticas naturales en recinto alambrado (platos)

mente las fluctuaciones climáticas, dentro del rango correspondiente a su tipo textural, variando, para la misma demanda evaporante, del simple al doble en los casos extremos (suelos de gravas, E, y arcilloso, D, respectivamente).

Finalmente, en la tabla puede verse, cómo para demandas evaporantes altas (mayor de 6 mm/día), solamente los suelos limoso (C), arcilloso (D) y areno + arcilloso (1:1) superan el valor de dicha demanda.

Experiencias con macetas

Las condiciones climáticas durante el curso de esta etapa se consignan en la tabla 5 (datos de Matacán también).

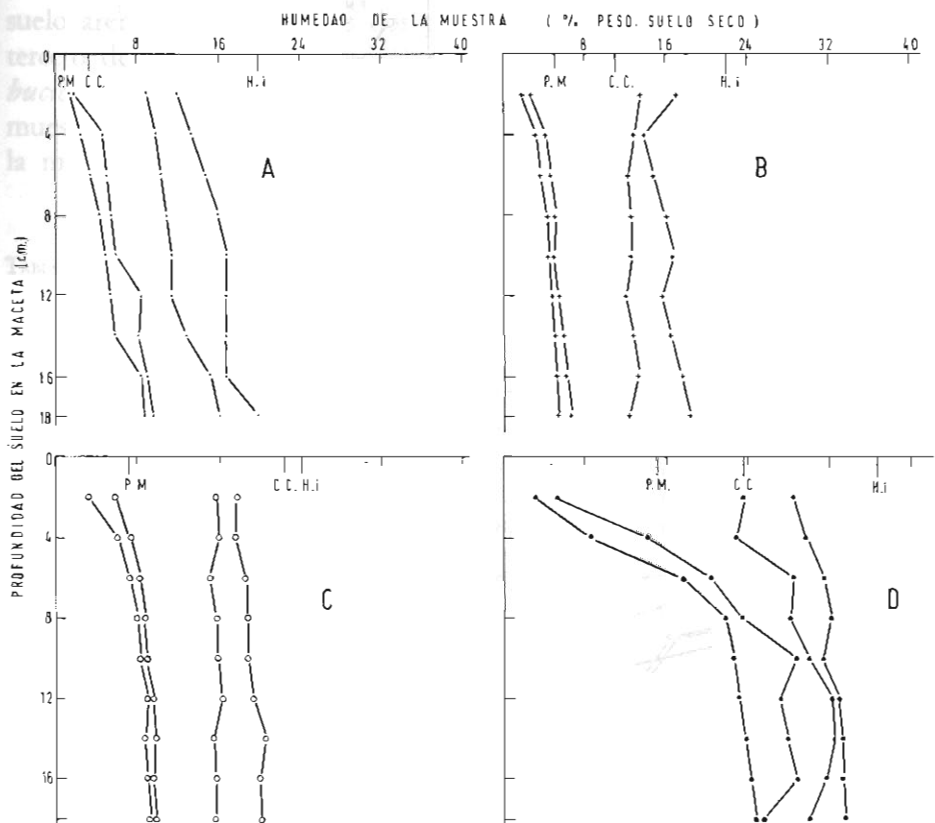


FIG. 6. Perfiles hídricos de los suelos (A) arenoso, (B) arenoarcilloso, (C) limoso y (D) arcilloso

De las muestras de suelos, con la humedad inicial de saturación, se realizaron las extracciones en orden al establecimiento de los perfiles hídricos correspondientes, según los balances que indican las expresiones:

particular, entre dos tomas de muestra $E_n = R_{n-1} - R_n$ y global: $E \text{ acum.} = R \text{ inicial} - R \text{ final}$.

Las respuestas de las diferentes muestras de suelos a la demanda climática, evaporación, están gráficamente reflejadas en las figuras 6 y 7. Su análisis permite conocer además las características del movimiento del agua en el interior de las macetas, ocasionado por los gradientes hídricos inducidos por la demanda climática.

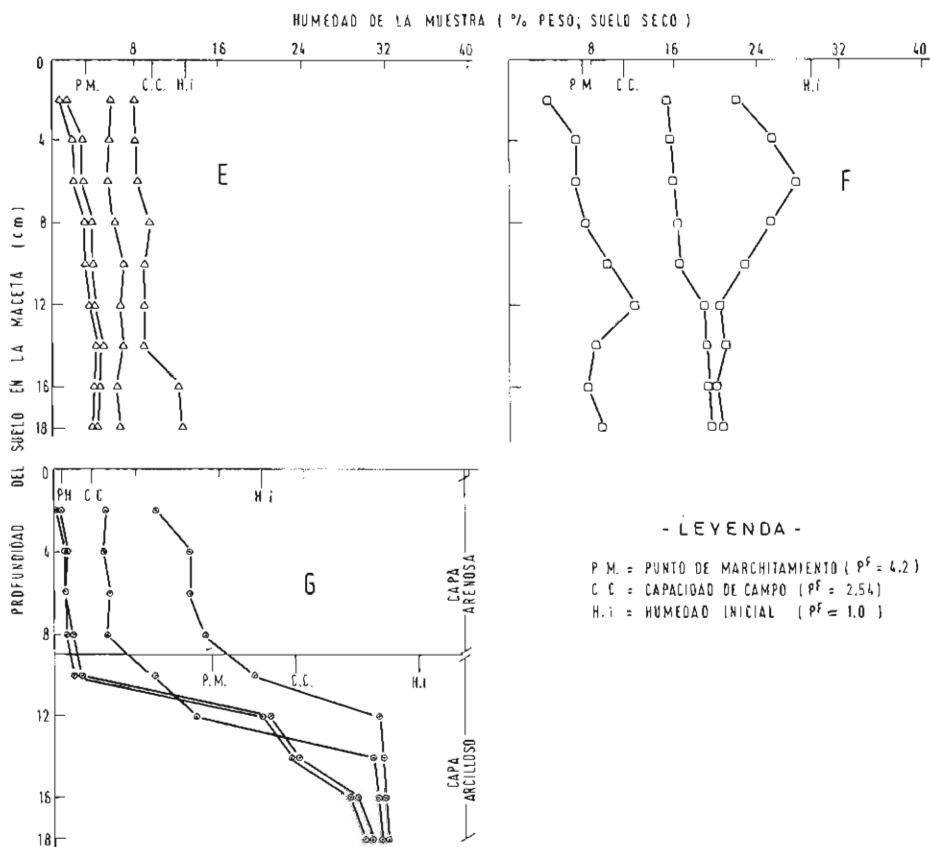


FIG. 7. Perfiles hídricos de los suelos (E) arenoarcilloso con gravas, (F) arenoso + arcilloso, y (G) arenoso/arcilloso

En las gráficas se observa que los *gradientes de humedad* de los suelos areno-arcilloso, limoso y areno-arcilloso con gravas son suaves y constantes; los del suelo arenoso se atenúan a partir del tercer día y hasta el final, manteniéndose la humedad en el último perfil a partir de los 6 cm. con un valor

superior al de la capacidad de campo; los del suelo arcilloso son altos hasta el día siete y se atenúan después; los del suelo arcilloso + arenoso (1:1) son pequeños y regulares; finalmente en el suelo arenoso/arcilloso, mientras la capa arenosa está aún húmeda (por encima del valor de la capacidad de campo), los gradientes de humedad de cada capa son semejantes a los de los suelos correspondientes, esto es, medios en la capa arenosa y altos en la arcillosa, y llega un momento en que la conductividad hidráulica está impedida a causa de la extrema desecación de la capa superior arenosa (con un porcentaje de humedad inferior al punto de marchitamiento) por lo que se conserva un buen grado de humedad (aproximadamente el de capacidad de campo) desde los 12 cm.

Los cambios en el sentido de las pendientes en el primer perfil del suelo areno-arcilloso, en los dos primeros del arcilloso y en el primero y tercero del areno + arcilloso (1:1), son debidos a fenómenos de redistribución de la humedad en el interior del perfil, al haber repuesto la muestra de suelo y su agua correspondiente después de la extracción de la muestra.

TABLA 6. CONDICIONES CLIMÁTICAS DURANTE LA EXPERIENCIA CON MACETAS, BAJO ABRIGO ALAMBRADO. DATOS DE LAS TEMPERATURAS, HUMEDAD RELATIVA DEL AIRE, RADIACIÓN GLOBAL Y DEMANDA EVAPORANTE DE LA ATMÓSFERA (PICHE)

DÍA	T máx.	T mín.	T med.	E (Piche)	Hr	Q (radiación global)
				Demanda evapor. mm.	Humedad relat. %	Calorías cm ² · día
(°C)						
1	26,0	15,5	20,8	7,0	36,0	697,9
2	32,5	11,0	21,7	7,5	34,5	596,9
3	33,0	18,0	25,5	8,2	30,5	727,0
4	36,0	14,0	25,0	10,8	22,5	654,3
5	33,5	17,5	25,5	10,0	28,0	654,3
6	29,0	16,5	22,8	8,5	44,5	545,5
7	26,5	12,0	19,2	5,5	45,0	779,7
8	27,5	13,5	20,5	6,1	32,0	613,7
9	28,0	14,0	21,0	5,7	31,5	664,2

En cuanto al grado de desecación, se observa en las gráficas que en la tercera fecha están a punto de marchitamiento los perfiles de los suelos arenoso + arcilloso (1:1), areno-arcilloso y de gravas, y entre los 6 y 10 cm., los restantes excepto el arenoso, que conserva un grado de humedad semejante al de su capacidad de campo en el último perfil desde los 6 cm.

Finalmente, las gráficas muestran que los *gradientes de evaporación* son medios y constantes hasta el día siete, y por este orden decreciente, en los suelos limoso, areno-arcilloso y areno-arcilloso con gravas; en el suelo arenoso son semejantes a los de los suelos anteriores y nulos al final de la experiencia; en el suelo arcilloso son tanto más elevados cuanto más cerca de la superficie y mucho más pequeños una vez desecado el suelo en superficie (8 cm.); en el areno-arcilloso (1:1) son elevados hasta el tercer perfil y medios y regulares en el último; por fin en el suelo arenoso/arcilloso son altos al principio en la capa arenosa y primeros centímetros de la arcilla, y a partir del segundo perfil, medios en la capa de arena y nulos en la de arcilla que conserva la humedad que posee en ese momento.

En cuanto a la evaporación de los suelos en esta etapa, la figura 8 representa, frente al tiempo en días, las pérdidas de agua por evaporación acumulada, en mm. La distinta evolución de las curvas se justifica por dos factores: reserva inicial de agua y movimiento del agua hacia la superficie evaporante. De la comparación entre el suelo arcilloso (D) y el suelo arenoso + arcilloso (1:1) (F), con una diferencia en la reserva inicial de 25 mm. a favor del primero, se deduce que la importancia del factor reserva es apreciable durante los 4 ó 5 primeros días de desecación, adquiriendo a partir de esta fecha, mayor importancia el factor *movilidad*, debido al cual, al final de la experiencia, existe una diferencia en la evaporación acumulada, de 4 mm. a favor del suelo arenoso + arcilloso (1:1) (F).

CÁLCULO DE LA EVAPORACIÓN

Finalmente, con los datos climatológicos obtenidos durante esta etapa, hemos calculado la evaporación según las fórmulas de PENMAN y de TURC.

La fórmula de Penman para el cálculo de la evaporación diaria en mm/día adopta la siguiente forma:

$$E \text{ (mm/día)} = \frac{P(t) \cdot Q_n + \gamma \cdot E_a}{\gamma + P(t)}$$

donde $P(t)$ = pendiente de la curva de presión de vapor frente a t .ª media del aire.

γ = coeficiente psicrométrico, con valor de $0,605 \text{ mb } ^\circ\text{C}^{-1}$ para la provincia de Salamanca.

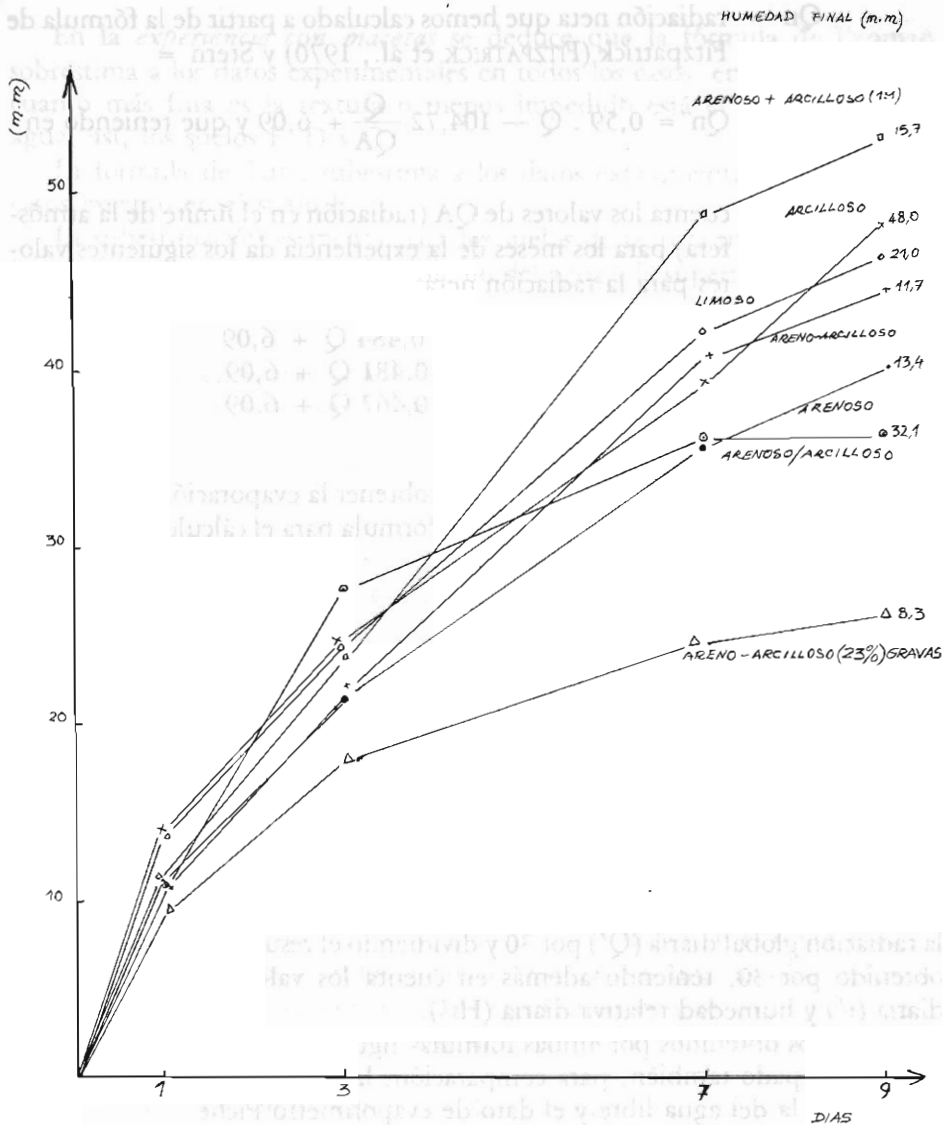


FIG. 8. Evaporación de agua acumulada, en (mm.) frente al tiempo en días, condiciones naturales en recinto alambrado (macetas)

E_a = poder desecante del aire que nosotros hemos sustituido por los valores del evaporamiento Piche.
 Teniendo en cuenta los trabajos de BLANCO DE PABLOS et al. (1974) y de GERBIER et al. (1972).

Q_n = radiación neta que hemos calculado a partir de la fórmula de Fitzpatrick (FITZPATRICK et al., 1970) y Stern =

$$Q_n = 0,59 \cdot Q - 104,72 \frac{Q}{Q_A} + 6,09 \text{ y que teniendo en}$$

cuenta los valores de Q_A (radiación en el límite de la atmósfera) para los meses de la experiencia da los siguientes valores para la radiación neta:

$$Q_n) \text{ Junio} = 0,484 Q + 6,09$$

$$Q_n) \text{ Julio} = 0,481 Q + 6,09$$

$$Q_n) \text{ Agosto} = 0,467 Q + 6,09$$

La fórmula de Turc está calculada para obtener la evaporación mensual en mm/día. Nosotros hemos aceptado dicha fórmula para el cálculo de la evaporación diaria multiplicando el valor de

$$E \text{ (mm/mes)} = \frac{0,4 t}{t + 15} \cdot \left(\frac{120 - Hr}{70} \right) \cdot \left(\frac{10 \cdot Q}{L} + 50 \right)$$

$$\frac{E}{30} \text{ (mm/día)} = \frac{0,4 t'}{t' + 15} \cdot \left(\frac{120 - Hr'}{70} \right) \cdot \left(\frac{300 Q'}{L} + 50 \right)$$

la radiación global diaria (Q') por 30 y dividiendo el resultado de evaporación obtenido por 30, teniendo además en cuenta los valores de temperatura diaria (t') y humedad relativa diaria (Hr').

Los datos obtenidos por ambas fórmulas figuran en la tabla 7, en la que hemos agrupado también, para comparación, la evaporación acumulada de cada suelo, la del agua libre y el dato de evaporímetro Piche.

De la observación de la tabla se deduce que en *la experiencia con platos*, la fórmula de Penman sobrestima a los suelos A, E y G; coincide aproximadamente (lo subestima en un 20 %) con el suelo de textura equilibrada, arenarcilloso y subestima a los suelos C, D y F en mayor cuantía cuanto mayor es la reserva de agua.

La fórmula de Turc subestima en todos los casos a los datos experimentales, en menor cuantía cuanto más gruesa es la textura o más impedido está el movimiento del agua, así, los suelos A, E y G.

En la *experiencia con macetas* se deduce que la fórmula de Penman sobrestima a los datos experimentales en todos los casos, en menor cuantía, cuanto más fina es la textura o menos impedido está el movimiento del agua, así, los suelos F, D y C.

La fórmula de Turc, subestima a los datos experimentales en todos los casos excepto en el suelo E.

La subestimación es menor para los suelos de textura más gruesa y para los que tienen impedido el movimiento del agua a la superficie, así suelos A y G.

TABLA 7. DATOS DE LA EVAPORACIÓN ACUMULADA AL FINAL DE LA EXPERIENCIA, EXPRESADOS EN mm., PARA LOS SUELOS, EL AGUA LIBRE Y EL PICHE ASÍ COMO LOS DATOS TEÓRICOS OBTENIDOS CON LAS FÓRMULAS DE PENMAN Y DE TURC

	SUELOS							AGUA Libre	PICHE	FORMULAS	
	A	B	C	D	E	F	G			Penman	Turc
Platos	33,79	36,69	50,22	64,60	30,30	46,94	33,86	40,86	34,30	35,73	23,19
Macetas	39,52	44,27	45,10	46,45	25,16	53,05	36,48	—	69,39	54,75	34,47

CONCLUSIONES

En las tres etapas experimentales

1. El *fenómeno de la evaporación* de agua de los suelos, para una misma demanda evaporante, está condicionado por dos factores dependientes de la textura. La reserva inicial de agua y su movilidad en el soporte suelo. La evaporación es mayor en los suelos de textura más fina, arcilloso y limoso (con reserva inicial de agua más alta) y en el suelo arenoso + arcilloso, en el que el movimiento de agua hacia la superficie evaporante se encuentra menos impedido.

La evaporación desde superficies de agua libre se asemeja a la del suelo de textura areno-arcillosa, y es diferente a la del resto de los suelos, en especial de los de textura más fina, que evaporan con mayor facilidad.

En la etapa de laboratorio

2. El *ritmo de evaporación* muestra tres estadios bien diferenciados, en los que, respectivamente, los suelos *saturados* se desecan con velocidades de evaporación tanto más elevadas cuanto más fina es la textura; a continuación, con un grado de humedad dentro de la *reserva útil*, solamente los suelos li-

moso y arcilloso se desecan con velocidades medias, superiores a la de la demanda evaporante, y finalmente durante el tercer estadio los suelos, ya *por debajo del punto de marchitamiento*, se desecan con velocidades de evaporación inferiores a la de la demanda evaporante, especialmente el arenoso, el de gravas y el arenoso/arcilloso.

En la etapa de condiciones naturales

3. En las experiencias con platos *los gastos diarios de agua* siguen regularmente las fluctuaciones climáticas, variando su magnitud de simple a doble en los casos extremos. Para demandas evaporantes altas (> 6 mm/día) sólo la superan los suelos limoso, arcilloso y arcilloso + arenoso (1:1).

4. En las experiencias con macetas, *el estudio de los perfiles de humedad* muestra la incidencia de la movilidad del agua en los diferentes suelos, lo que ocasiona una gran diferenciación en los gradientes de humedad y de evaporación, destacando la contribución positiva del componente arenoso a la constancia de los gradientes de evaporación en el caso del suelo arenoso + arcilloso y su efecto «protector» sobre la reserva de agua en el suelo arenoso/arcilloso.

5. *La evaporación de agua de los suelos es diferente de las calculadas por las fórmulas de Penman y de Turc.*

En la experiencia con platos, el dato de evaporación de agua libre y el obtenido por la fórmula de Penman se adaptan bien a los resultados experimentales para el suelo arenoarcilloso, *sobrestimando* a los suelos arenoso, arenoarcilloso con gravas y arenoso sobre arcilloso y *subestimando* a los suelos arcilloso, limoso y arenoso mezclado con arcilloso.

La fórmula de Turc, *subestima* a los resultados experimentales, adaptándose mejor a éstos en el caso de los suelos arenoso, arenoarcilloso con gravas y arenoso sobre arcilloso.

En la experiencia con macetas, la fórmula de Penman se adapta mejor a los resultados experimentales en el caso de los suelos arcilloso, limoso y arenoso mezclado con arcilloso al 50 %.

La fórmula de Turc sigue *subestimando* a los resultados experimentales, adaptándose mejor a los suelos arenoso, arenoarcilloso con gravas y arenoso sobre arcilloso.

BIBLIOGRAFIA

- ABICHANDANI, C. T.; KRISHMAN, A.; BHATT, P. N. (1967): *Some observations on soil moisture changes in arid zone soils.* Journal Indian Soc. Soil., Sci., 15, 7-15.

- ADAMS, J. E.; RITCHIE, J. T.; BURNETT (1969): *Evaporation from a simulated soil shrinkage crack*. Proc. Soil. Sci. Am., 33, 609-613.
- ALIZAI, H. U.; HULBERT, L. C. (1970): *Effects of soil texture on evaporative loss and available water in semiarid climates*. Soil. Sci., 110, 328-332.
- ASLING, H. C. (1965): *Evaporation, evapotranspiration and water balance investigations at Copenhagen (1955-1964)*. Acta Agric. Scand., 15, 284-300.
- BLACK, T. A.; GARNER, W. R. and THURTELL, G. W. (1969): *The prediction of evaporation, drainage and soil water storage for a bare soil*. Proc. Soil. Sci. Soc. Am., 33, 655-660.
- BLANC, M. L.; COHEN, O. P. (1967): *Climate and soil moisture extraction in Gilat (Israel)*. Agric. Met., 4, 367-371.
- BLANCO DE PABLOS, A. y PERRIER, A. (1974): *El evaporímetro Piche integrador del déficit de saturación. Aplicación de una nueva fórmula de cálculo de la evaporación*. Coloquio sobre problemas de Meteorología Agrícola, Murcia, noviembre 1972. Public. Asociación Española para el Progreso de las Ciencias, Madrid, 1974.
- CUADRADO SÁNCHEZ, S. y BLANCO DE PABLOS, A. (1977): *Modalidades del balance hídrico de los suelos de la región Centro-Oeste de España*. Anu. Cent. Edafol. Biol. Apl. Salamanca, vol. III, 189-206.
- EAGLESON, P. S. (1978): *Climate, soil and vegetation. 1. Introduction to water balance dynamics*. Water Rech., 14(5): 705-712. 6. *Dynamics of the annual water balance*. Water resources Res., 14(5), 749-764.
- FITZPATRICK, E. A. and STERN, W. R. (1970): *Net radiation estimated from global solar radiation*. Symposium on Plant Response to Climate Factors. Unesco-Upsala, Sweden, 15-20 september.
- FULTON, J. M. (1978): *Evaporation from bare soil compared with evapotranspiration from a potato crop*. Can. Jour. Soil. Sci., 46, 199-204.
- GARDNER, W. R., HILLEL, D. and BENYAMINI, Y. (1970): *Post irrigation movement of soil water. Simultaneous evaporation and redistribution*. Water Resources Res., 6(4), 1.148-1.153.
- GARMENDIA IRAUNDEGUI, J. (1964): *Estudio Climatológico de la provincia de Salamanca*. Publicaciones del I.O.A.T.O. (Salamanca), I y II.
- GERBIER, N.; BROCHET, P. (1972): *Une méthode pratique de calcul de l'évapotranspiration potentielle*. Ann. Agr., 23(I), 31-49.
- GILL, K. S.; JALOTA, S. K. and PRITHAR, S. S. (1977): *Water conservation by soil mulch in relation to soil type, time of tillage, tith and evaporativity*. Jour. of the Indian Soc. of Soil Sci., 25(4), 300-366.
- HENIN, S.; GRAS, R. et MONNIER, R. (1972): *El perfil cultural. El estado físico del suelo y sus consecuencias agronómicas*. Ed. Mundi-Prensa, Madrid.
- NORERO, A. L. (1969): *A formula to express evapotranspiration as a function of soil moisture and evaporation demande of the atmosphere*. Ph. D. Diss. Utah State University, Logan, Utah. Ann. Arbor, Michigan, University Microfilm, Inc.
- PENMAN, H. L. (1948): *Natural evaporation from open water, bare soil and grass*. Proc. Roy. Soc., Serv. A., 193, 120-146.
- PENMAN, H. L. (1968): *Available and accessible water*. Trans. 9th Int. Congr. Soil Sci., 9, 29-37.
- RAFI, M. (1964): *Contribution to the study of evaporation from bare soil*. Géogr. Phys. Géol. Dyn., 6, 167-172.
- RICHARDS, L. A. (1949): *Methods of measuring soil tension*. Soil Science, 68, 95-112.
- SERMER, A. (1968): *Methods and formulas for the determination of soil evapotranspiration and soil moisture content from hydrometeorological data*. Publ. Int. Ass. Sci. Hydr./Unesco. Symp. Wageningen, 83, 644-650.

- TURC, L. (1961): *Evaluation des besoins en eau d'irrigation. Evapotranspiration potentielle.* Ann. Agr., 12, 13-49.
- WILCOX, J. C. (1967): *Effect of soil texture, net evapotranspiration and other factors on irrigation requirements of orchards as determined by a scheduling procedure.* Can. Journal Soil Sci., 47, 149-156.