

EVAPORACION Y TRANSPIRACION

Aldo Norero Sch.



CIPINT

El Centro Interamericano de Desarrollo Integral de Aguas y Tierras (CIDIAT) fue establecido en el año 1964 mediante un acuerdo entre el Gobierno de Venezuela, la Universidad de Los Andes y la Organización de Estados Americanos (OEA).

Después de 10 años de operación y cumplido el proceso de transferencia, el CIDIAT pasó a ser un Centro Venezolano dirigido y administrado conjuntamente por el Gobierno de Venezuela y la Universidad de Los Andes.

Además, para sustentar las actividades del CIDIAT en países miembros de la OEA, se firmó un nuevo acuerdo que rige el denominado "Programa Interamericano" el cual se realiza conjuntamente por el CIDIAT como Institución Venezolana y la Secretaría General de la OEA.

EVAPORACION Y TRANSPIRACION

Serie Suelos y Clima
Material de Enseñanza

No. SC-13

ALDO NORERO SCH.

Preparado para el Curso de Conservación de
Aguas y Tierras. CIDIAT. Mérida, Octubre,
1976



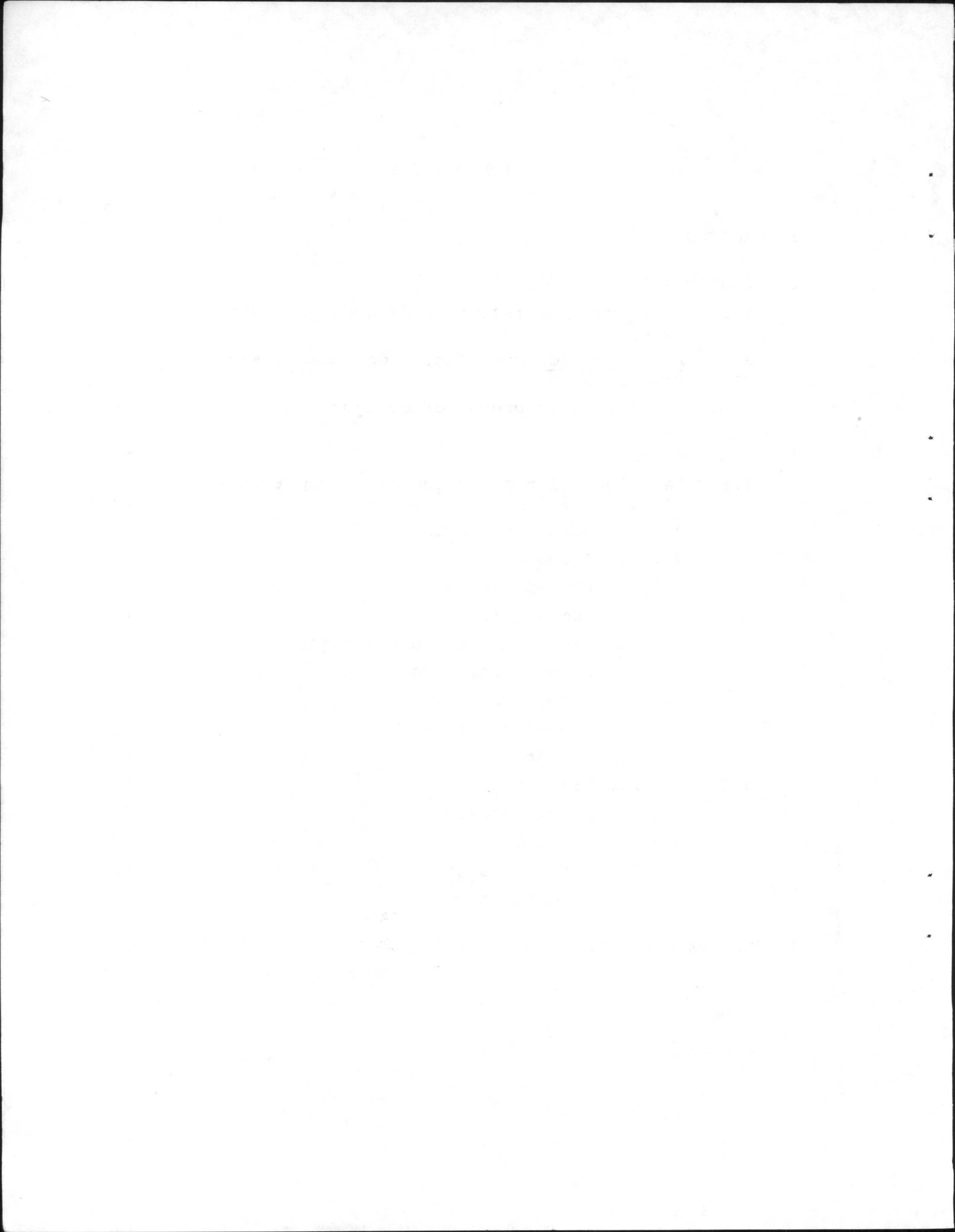
WORLD WAR II TRANSPORTATION

1945

U.S. DEPARTMENT OF COMMERCE
BUREAU OF MARITIME SERVICE

I N D I C E

	pag.
1. INTRODUCCION	1
2. FUNDAMENTOS	3
2.1. <u>El Clima</u> como factor de demanda potencial de agua.	3
2.2. <u>La Vegetación</u> como factor de demanda efectiva de agua.	11
2.3. <u>El Suelo</u> como proveedor de agua	22
3. APLICACIONES	33
3.1. Cálculos del riego asociado a evapotranspiración máxima.	33
3.1.1. Datos necesarios	33
3.1.2. Ejemplo 1	37
3.1.3. Procedimiento	37
3.1.4. Comentarios	44
3.2. Cálculos del riego en turnos fijos	44
3.2.1. Datos necesarios	45
3.2.2. Ejemplo 2	45
3.2.3. Procedimiento	45
3.2.4. Comentarios	50
3.3. Balance hídrico	51
3.3.1. Datos necesarios	52
3.3.2. Ejemplo 3	52
3.3.3. Procedimiento	52
3.3.4. Comentarios	56
4. LITERATURA CITADA	59



EVAPORACION Y TRANSPIRACION

Por:

Aldo Norero Sch.
Profesor del CIDIAT.

INTRODUCCION

Conservar el agua y la tierra es utilizar estos recursos de manera que el hombre se beneficie permanentemente con ellos. Utilizar significa intervenir, y a menudo alterar el curso natural de los acontecimientos que confieren al suelo y al agua sus benéficas propiedades. El uso irreflexivo deteriora, mengua o extingue estos recursos; la utilización juiciosa de ellos mejora su aptitud natural, preserva su capacidad productiva y asegura su permanencia. Conservar es entonces, usar adecuadamente. La Ingeniería conservacionista es la que consigue derivar beneficios de las tierras y aguas manteniendo un balance positivo entre las tendencias contrapuestas que generan el uso y el abuso.

En la Agricultura, la conservación de la tierra depende estrechamente de cómo se usa el agua; y la conservación del agua, de cómo se usa la tierra. La erosión natural o provocada y la salinización del suelo por el riego son ejemplos típicos de lo primero. La contaminación del agua por pesticidas y fertilizantes es un ejemplo bien conocido de lo segundo. Pero, no sólo el abuso indebido de los recursos renovables sino también la ineficiente utilización de ellos, es una forma negativa de la conservación. Si el agua se usa ineficientemente, se hace también ineficiente el uso del suelo. Si la tierra no se utiliza con eficiencia, tampoco resulta eficiente la utilización del agua. Si la tierra es fértil, la aplicación de mucha o de muy poca agua, significa perder los minerales que podían aprovechar los cultivos. Si el agua es abundante, la aplicación de insuficiente abono o

la defensa inoportuna de plagas o peste, significa desperdiciar el aporte del riego a la productividad vegetal. Es una consecuencia del principio de los elementos limitantes. No utilizar cabalmente la tierra y el agua según su capacidad es también un despilfarro, como lo es el usarlos a una intensidad superior a su capacidad. A menudo se insiste en Conservación que lo que se usa intensa y exhaustivamente se pierde con rapidez, y a menudo con catastróficas consecuencias agroecológicas. Es verdad. Pero no siempre se advierte que lo que no se usa adecuada y oportunamente también es una pérdida; imperceptible por cierto y menos dramática que las profundas cárcavas de la tierra, las manchas salitrosas sobre el suelo o la turbidez o suciedad de las aguas. Pero, es una pérdida crónica y sus resultados finales son los mismos: la creciente incapacidad del recurso de responder a las necesidades del hombre.

La Agricultura consume enormes cantidades de agua por la vía de la evapotranspiración. El suelo almacena el agua, la vegetación la consume, y la atmósfera la extrae. Las plantas, aún las llamadas terrestres, son organismos fisiológicamente acuáticos: su máximo rendimiento biológico lo mantienen por una permanente hidratación. La transpiración, impulsada por el poder desecante de la atmósfera, hace fluir agua del suelo a las raíces y crea así internamente en la planta el ambiente acuático necesario a su fisiología. Además, por transpiración se desprende una parte considerable de la exagerada carga energética que la vegetación recibe del sol y del calor del aire. Por eso, la transpiración es una evaporación productiva. En cambio, la evaporación de agua directamente del suelo, es improductiva. Usar eficientemente el agua y la tierra en agricultura es, en este caso, hacer que el tránsito del agua del suelo, a través de la planta, hacia la atmósfera sea lo más productivo posible.

El riego es la práctica de ingeniería más obvia para elevar la eficiencia del agua y la tierra. Con él se regulariza

el suministro de agua según las exigencias de los cultivos. El conocimiento de la intensidad de evaporación y transpiración de los terrenos cultivados es básico en la formulación de proyectos y ejecución de obras y prácticas de riego.

También interesa a la agronomía conservacionista adecuar la agricultura de lluvia a los ciclos pluviométricos, de modo que las exigencias de agua de los cultivos sean satisfechas en la mayor proporción posible con estos irregulares aportes naturales. La diferencia entre la oferta de agua (lluvias) y la demanda de la vegetación (evapotranspiración) debe dejar el mejor saldo. En este balance, el suelo juega un importante rol media dor, porque posee una limitada capacidad de retener agua y la que almacena es cedida gradualmente a las plantas. Su efecto es, por consiguiente, amortiguar las abruptas transiciones de humedad de los períodos de lluvia y sequía. Suelo, plantas y atmósfera forman así un sistema integrado y unitario que el ingeniero debe comprender si pretende derivar de él un sostenido beneficio. La evapotranspiración es un importante proceso físico de este sistema.

2. FUNDAMENTOS.

2.1. EL CLIMA como factor de demanda potencial de agua.

La *evaporación* es el proceso físico por el cual el agua de un cuerpo terrestre experimenta un cambio de fase, de líquido a gas, y es transferido a la atmósfera circundante. La *transpiración* es la evaporación de agua en los organismos vivos, incluyendo las plantas. La *evapotranspiración* es la evaporación simultánea desde un suelo cubierto de vegetación y desde los te jidos de las plantas, principalmente hojas.

Ocurre evaporación cuando existe: (a) energía para cambiar la fase líquida a gaseosa; (b) cabida en la atmósfera para al-

bergar el vapor desprendido de la superficie, y (c) remoción del vapor acumulado sobre la superficie, (Figura 1).

La vaporización de 1 cm³ (1 gr) de agua absorbe aproximadamente 580 calorías; éste es el *calor latente* de evaporación. Las fuentes de energía para la evaporación son: (a) la radiación solar; (b) la radiación de onda larga de la atmósfera, u otros cuerpos terrestres, y (c) el calor sensible del aire que rodea la superficie húmeda, si ésta tiene menor temperatura que aquel.

El déficit de presión de vapor, Δv , la humedad relativa, HR, son expresiones comunes de la capacidad del aire de admitir vapor. El primer término se refiere a la diferencia entre la presión de vapor del aire si estuviese saturado, v_{sat} , y la que realmente tiene en un momento dado, v ; es decir, $\Delta v = v_{sat} - v$. El segundo término es la proporción entre los mismos parámetros, expresada en porcentaje; es decir, $HR = 100 v/v_{sat}$. La presión de vapor a saturación, v_{sat} , depende de la temperatura (Tabla 1).

La remoción de vapor junto a la superficie ocurre por simple difusión, por convección espontánea, y más frecuentemente, por la convección forzada promovida por la turbulencia del aire.

Por consiguiente, los factores climáticos que causan la evapotranspiración son: (a) la radiación (solar y terrestre); (b) la temperatura del aire; (c) la humedad relativa, y (d) el viento. La evaporación es potencialmente elevada en días largos, de intensa radiación, escasa nubosidad, alta temperatura, secos y ventosos. Por el contrario, la evaporación es reducida en días cortos, nublados, fríos, húmedos y calmos. En el primer caso, la evaporación, medida en evaporímetro estandar tipo A puede exceder los 10 mm diarios; en el segundo caso, su valor suele ser inferior a los 3 mm diarios.

El evaporímetro es un aparato que mide la influencia integral de los factores meteorológicos en la evaporación. Consiste

R_g , radiación de onda corta;
 " " solar
 R_L , " de onda larga;
 " " atmosférica
 H , calor sensible del aire
 V , contenido de vapor del aire
 U , viento
 e , moléculas de agua líquida
 ϕ , " de agua vaporizada
 x , " de vapor

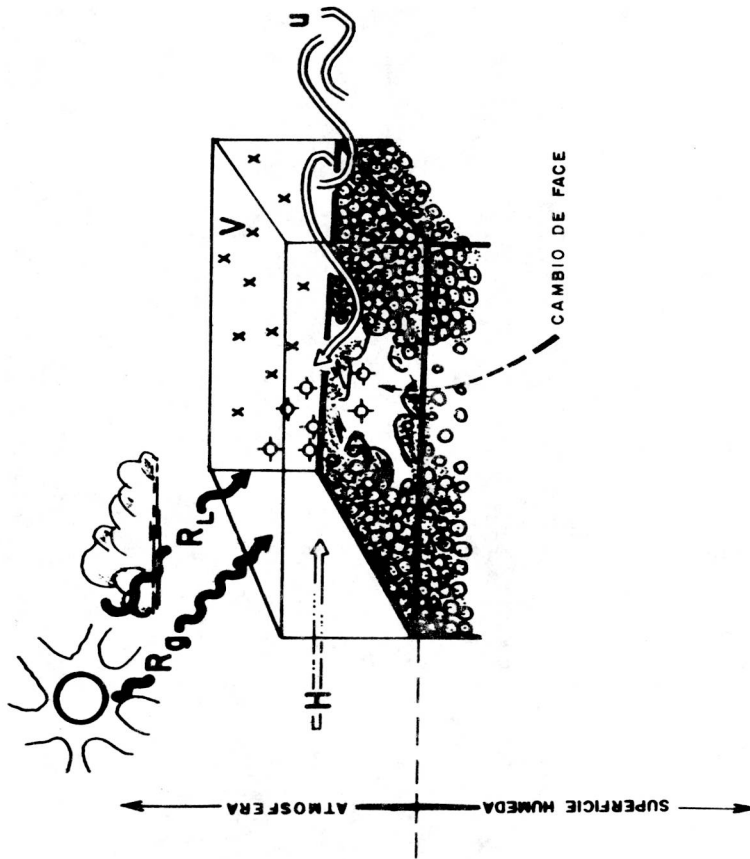


Figura 1. La evaporación requiere una fuente de energía para el cambio de fase (radiación, R_g , R_L y/o calor sensible, H), una capacidad para llenar de vapor un volumen de aire (déficit de vapor, V), y un agente de remoción y transporte del agua vaporizada desde la superficie húmeda a la atmósfera (turbulencia espontánea, o forzada por el viento, U).

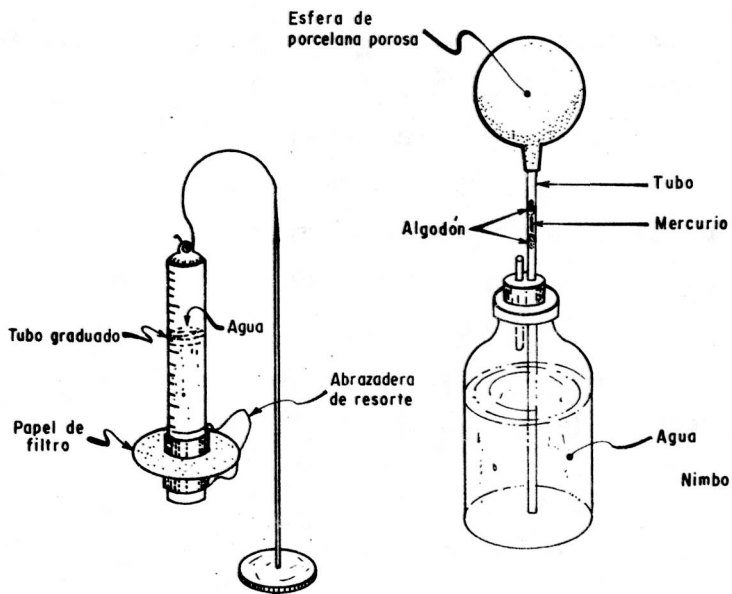
TABLA 1. Presión de vapor de saturación, v , en función de la temperatura; mm/Hg. (de: Handbook of Chemistry and Physics, 49th Ed., pp. D-109).

T_2	.0	.1	.2	.3	.4	.5	.6	.7	.8	.9
-10	2,15									
-9	2,32	2,30	2,29	2,27	2,26	2,24	2,22	2,21	2,19	2,17
-8	2,51	2,49	2,47	2,45	2,43	2,41	2,40	2,38	2,36	2,34
-7	2,71	2,69	2,67	2,65	2,63	2,61	2,59	2,57	2,55	2,53
-6	2,93	2,91	2,89	2,86	2,84	2,82	2,80	2,77	2,75	2,73
-5	3,16	3,14	3,11	3,09	3,06	3,04	3,01	2,99	2,97	2,95
-4	3,41	3,39	3,37	3,34	3,32	3,29	3,27	3,24	2,22	3,18
-3	3,67	3,64	3,62	3,59	3,57	3,54	3,51	3,49	3,46	3,44
-2	3,96	3,93	3,90	3,87	3,84	3,82	3,79	3,76	3,73	3,70
-1	4,26	4,23	4,20	4,17	4,14	4,11	4,08	4,05	4,02	4,00
0	4,58	4,55	4,51	4,48	4,45	4,42	4,39	4,36	4,32	4,29
0	4,58	4,62	4,65	4,69	4,71	4,75	4,78	4,82	4,86	4,89
1	4,93	4,96	5,00	5,03	5,07	5,11	5,14	5,18	5,22	5,25
2	5,29	5,33	5,37	5,41	5,45	5,49	5,53	5,57	5,60	5,64
3	5,68	5,72	5,77	5,81	5,85	5,89	5,93	5,97	6,01	6,06
4	6,10	6,14	6,19	6,23	6,27	6,31	6,36	6,40	6,45	6,49
5	6,54	6,58	6,64	6,68	6,73	6,77	6,82	6,87	6,92	6,96
6	7,01	7,06	7,11	7,16	7,21	7,25	7,31	7,36	7,41	7,46
7	7,51	7,56	7,62	7,67	7,72	7,77	7,83	7,88	7,94	7,98
8	8,04	8,10	8,15	8,21	8,27	8,32	8,38	8,43	8,49	8,54
9	8,61	8,67	8,73	8,78	8,84	8,90	8,96	9,02	9,09	9,14
10	9,21	9,26	9,33	9,39	9,45	9,52	9,58	9,65	9,71	9,77
11	9,84	9,91	9,90	10,04	10,11	10,17	10,24	10,31	10,38	10,45
12	10,52	10,58	10,66	10,72	10,80	10,87	10,94	11,00	11,08	11,15
13	11,23	11,30	11,38	11,45	11,53	11,60	11,68	11,76	11,83	11,91
14	11,99	12,06	12,14	12,22	12,30	12,38	12,46	12,54	12,62	12,70
15	12,79	12,86	12,95	13,03	13,12	13,20	13,29	13,37	13,46	13,54
16	13,63	13,72	13,81	13,90	13,99	14,08	14,17	14,26	14,35	14,44
17	14,53	14,62	14,71	14,80	14,90	14,99	15,09	15,18	15,28	15,38
18	15,48	15,57	15,67	15,77	15,87	15,97	16,07	16,17	16,27	16,37
19	16,48	16,58	16,68	16,79	16,89	17,00	17,10	17,21	17,32	17,43
20	17,53	17,64	17,75	17,86	17,97	18,08	18,20	18,31	18,42	18,54
21	18,65	18,77	18,88	19,00	19,11	19,23	19,35	19,47	19,59	19,71
22	19,83	19,95	20,07	20,19	20,32	20,44	20,57	20,69	20,82	20,93
23	21,07	21,19	21,32	21,45	21,58	21,71	21,84	21,97	22,11	22,24
24	22,38	22,51	22,65	22,78	22,92	23,06	23,20	23,34	23,48	23,62
25	23,76	23,90	24,04	24,18	24,33	24,47	24,62	24,76	24,91	25,06
26	25,21	25,36	25,51	25,66	25,81	25,96	26,12	26,27	26,43	26,48
27	26,74	26,90	27,06	27,21	27,37	27,53	27,70	27,86	28,02	28,18
28	28,35	28,51	28,68	28,85	29,02	29,18	29,35	29,52	29,70	29,87
29	30,04	30,21	30,39	30,56	30,74	30,92	31,10	31,28	31,46	31,64
30	31,82	32,00	32,19	32,37	32,56	32,74	32,93	33,12	33,31	33,50
31	33,70	33,89	34,08	34,28	34,47	34,66	34,86	35,06	35,26	35,46
32	35,66	36,86	36,07	36,27	36,48	36,68	36,89	37,10	37,31	37,52
33	37,73	37,94	38,16	38,37	38,58	38,80	39,02	39,24	39,46	39,68
34	39,90	40,12	40,34	40,57	40,80	41,02	41,25	41,48	41,71	41,94
35	42,18	42,41	42,64	42,88	43,12	43,36	43,60	43,84	44,08	44,32
36	44,56	44,10	45,05	45,30	45,55	45,80	46,05	46,30	46,56	46,81
37	47,07	47,32	47,58	47,84	48,10	48,36	48,63	48,89	49,16	49,42
38	49,69	49,96	50,28	50,50	50,77	51,04	51,32	51,60	51,88	52,16
39	52,44	52,72	53,01	53,29	53,58	53,87	54,16	54,45	54,74	55,08
40	55,32	55,61	55,91	56,21	56,51	56,81	57,11	57,41	57,72	58,03
T_2	.0	.1	.2	.3	.4	.5	.6	.7	.8	.9

en una superficie mojada, o simplemente agua, expuesta libremente a la intemperie. En el evaporímetro Piche (Figura 2.a) la superficie mojada es un papel de filtro; en el evaporímetro de Livingston (Figura 26), es una esfera de cerámica porosa. En las bandejas o tinas de evaporación el agua está contenida en recipientes, de los cuales existen diversos tipos, tamaños y disposiciones. En la balanza tipo Wild (Figura 2.c) la pérdida de agua por evaporación se registra gravimétricamente; en otras tinas, se mide como altura (lámina) evaporada (Figura 2.d).

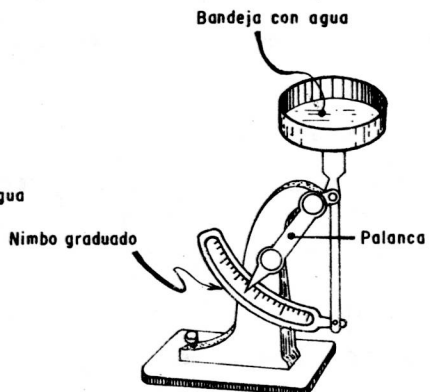
El valor obtenido en evaporímetro es un índice comparativo de la demanda de vapor, o poder desecante, de la atmósfera. No tiene valor absoluto porque sus resultados dependen del instrumento usado y de la forma en que es instalado. Al cambiar la naturaleza, tamaño y disposición del aparato se modifican el régimen aerodinámico que afecta la remoción de vapor y la transferencia de calor, y el intercambio de radiación entre el instrumento y la atmósfera (Figura 3.a y b). Por eso se ha convenido adoptar un *evaporímetro estandar*, cuyas especificaciones deben cumplirse meticulosamente. Uno de éstos es el evaporímetro tipo A (Figura 4).

La dependencia de la evaporación en los factores meteorológicos puede ilustrarse comparando la evolución de los parámetros climáticos con los registros evaporimétricos típicos de los Altos Llanos Occidentales de Venezuela (Figura 5.a y b) (Norero, 1976, b). La demanda de vapor de la atmósfera es máxima cuando los cuatro factores promotores de la evaporación coinciden en sus máximos valores. Esto ocurre entre Febrero y Abril. Por el contrario la evaporación es mínima entre Mayo y Agosto cuando la temperatura, el viento y el déficit de vapor coinciden en su mínimo valor y la radiación solar se encuentra en su mínimo anual secundario. Entre Agosto y Octubre la radiación vuelve a intensificarse, pero los otros tres factores no han aumentado apreciablemente, y la evaporación muestra solo un moderado incremento. Su



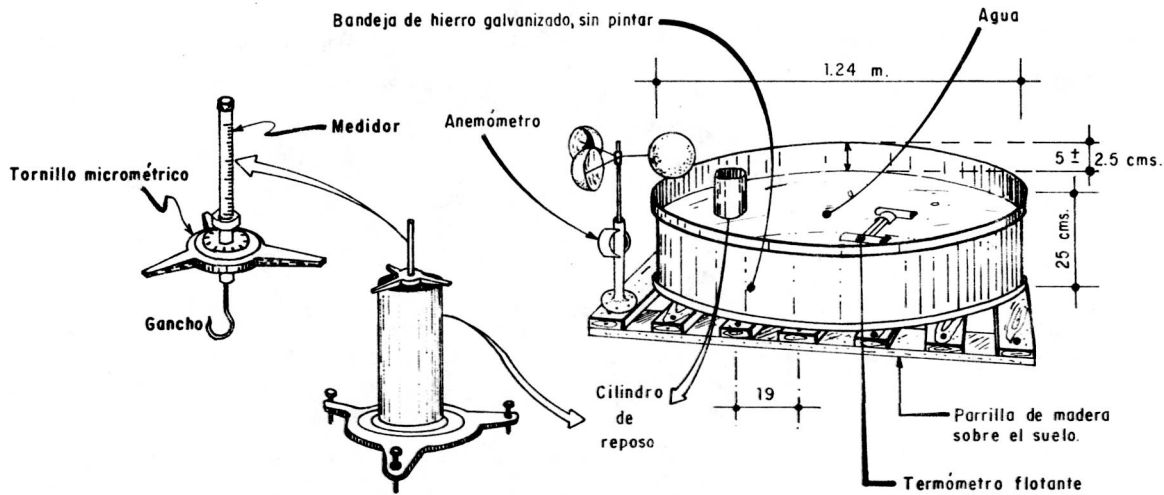
(a) PICHE (b) LIVINGSTON

Figura 2. Atmómetros



WILD

Figura 3. Evaporímetro de balanza



(d) TANQUE TIPO "A"

Figura 4. Evaporímetro de tina, tipo A.

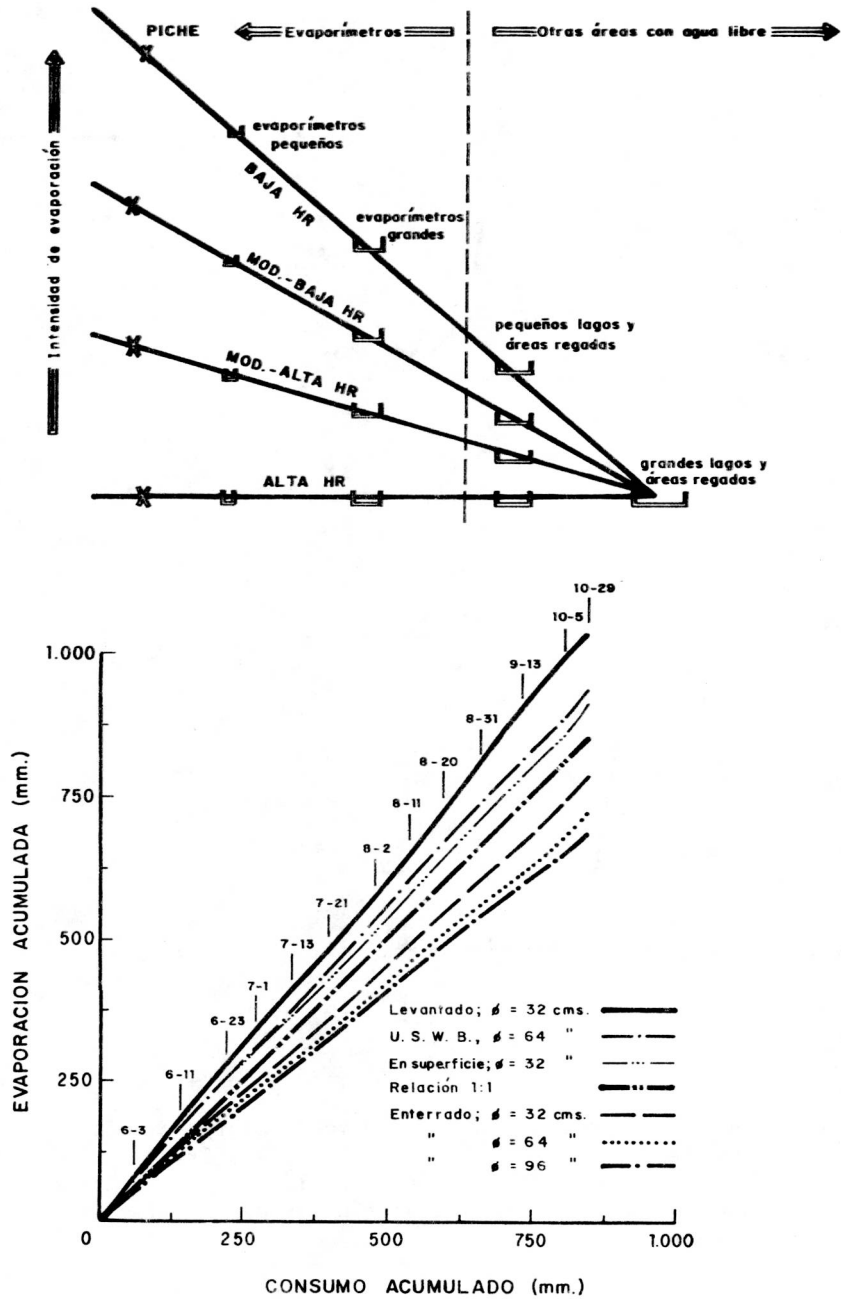


Figura 3 (a) Relación esquemática entre el tamaño de la superficie evaporadora y la intensidad de evaporación; (b) Correlación entre la evapotranspiración acumulada de trébol ladino y varios evaporímetros.

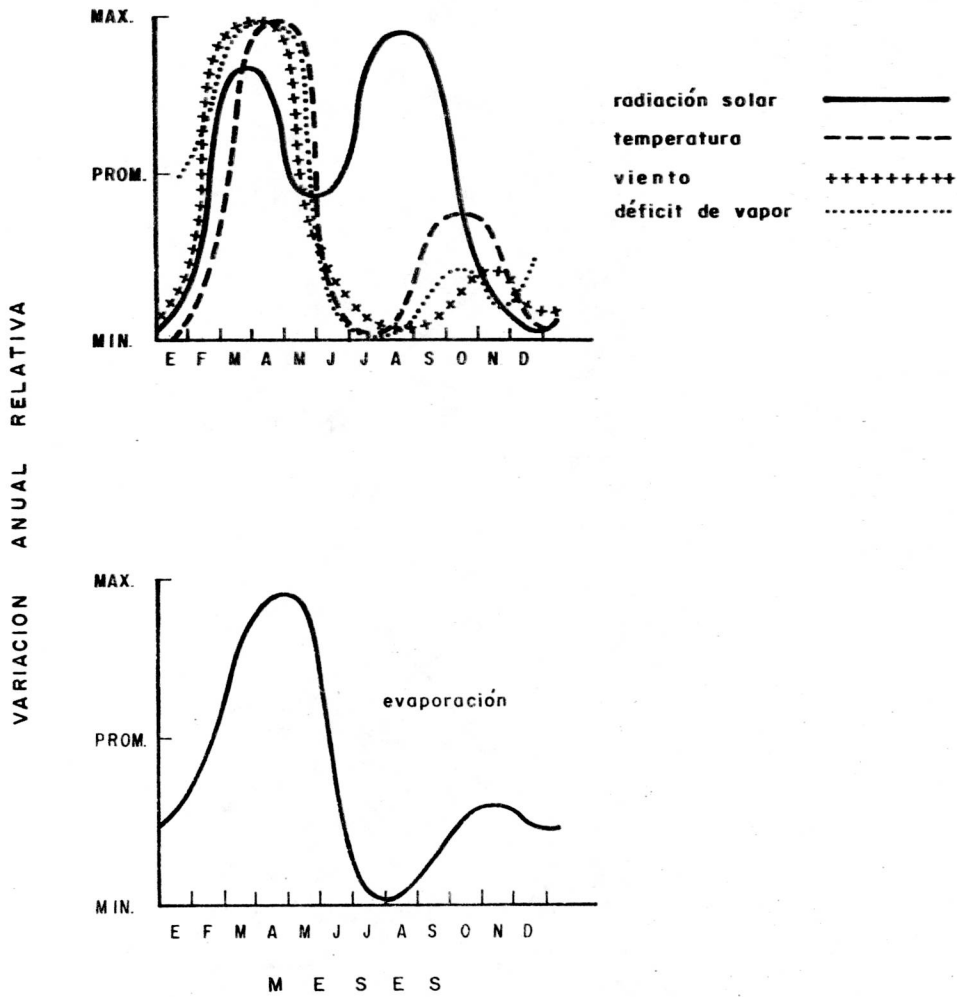


Figura 5. a) Variaciones anuales relativas de los factores climáticos que determinan la evaporatividad atmosférica y b) variaciones relativas de la evaporación medida en tina standar. Condiciones promedios típicas de los Altos Llanos Venezolanos.

magnitud sigue siendo moderada hacia fin de año por la decreciente radiación solar.

2.2 LA VEGETACION como factor de demanda efectiva de agua.

En iguales circunstancias climáticas, diferentes tipos de evaporímetros pierden agua a diferente intensidad (Figura 3). Lo mismo ocurre con diferentes tipos de vegetación, puesto que las plantas se comportan físicamente como un complejo sistema de superficies evaporantes. La morfología de la vegetación altera las características de la atmósfera superficial y establece un microclima especial (Rosemberg, 1974), o *fitoclima* (Figura 6) (Noro, 1976 a). Las características ecofisiológicas que determinan el fitoclima son aquellas relacionadas con la absorción, reflexión y transmisión de energía radiante, y las que afectan la turbulencia o velocidad del aire entre las hojas (Monteith, 1975). Entre las principales características vegetales cabe mencionar el albedo o coeficiente de reflexión, la inclinación, tamaño, forma y densidad del follaje, la altura y flexibilidad de las plantas, y si se trata de cultivos en líneas distanciadas, la orientación de la siembra.

El fitoclima se manifiesta por la distribución vertical de los parámetros meteorológicos que afectan la evaporación (Figuras 7 y 8). La transpiración en un estrato foliar dado, E_f , depende del balance de energía, $\mathcal{L}E_f = R_{Nf} \pm H_f$, y de las condiciones de transferencia de vapor, $E_f = K_w(e_h - e)$, y de calor $H_f = K_c(T_h - T)$ entre las hojas de ese estrato y el aire circundante. \mathcal{L} es el calor latente; R_{Nf} , es la radiación neta de las hojas, que resulta del balance de radiación entre la planta y su ambiente. En él intervienen, fenómenos de reflexión, transmisión y absorción de energía radiante a través del follaje; K_w y K_c son los coeficientes de transmisión de vapor y de calor en el estrato f y dependen del régimen del viento y propiedades aerodinámicas de la vegetación. El balance de energía y las transferencias de vapor

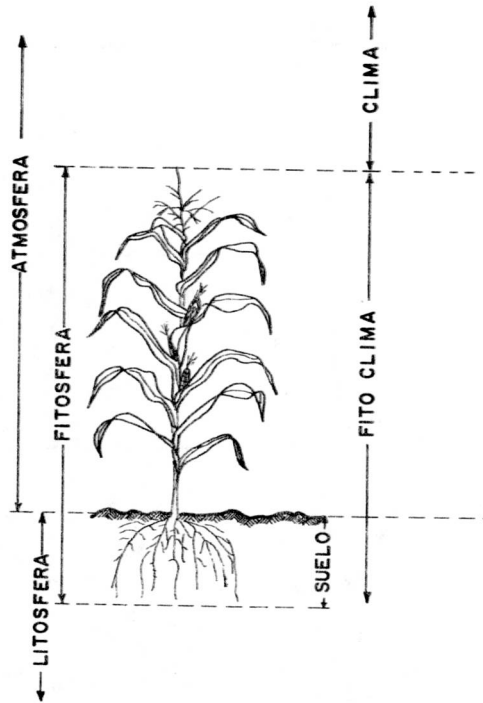


Figura 6. Esquema del ambiente físico de las plantas cultivadas ámbitos ecológicos principales.

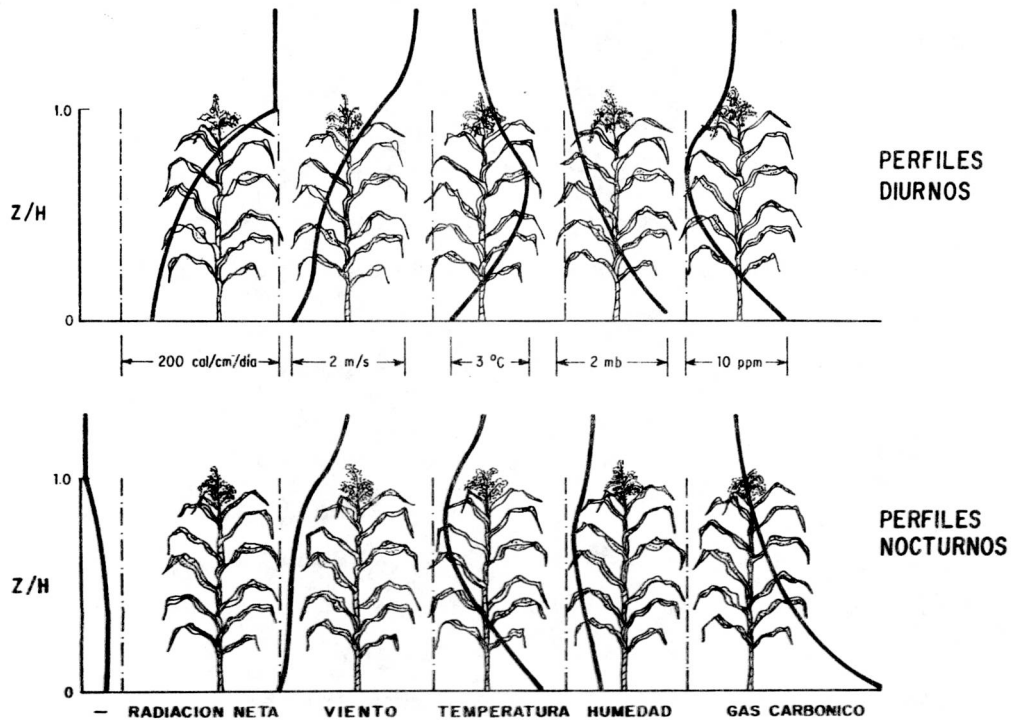


Figura 7. Perfiles climáticos, ilustrando variaciones típicas en la magnitud de variables meteorológicas en las cubiertas vegetales.

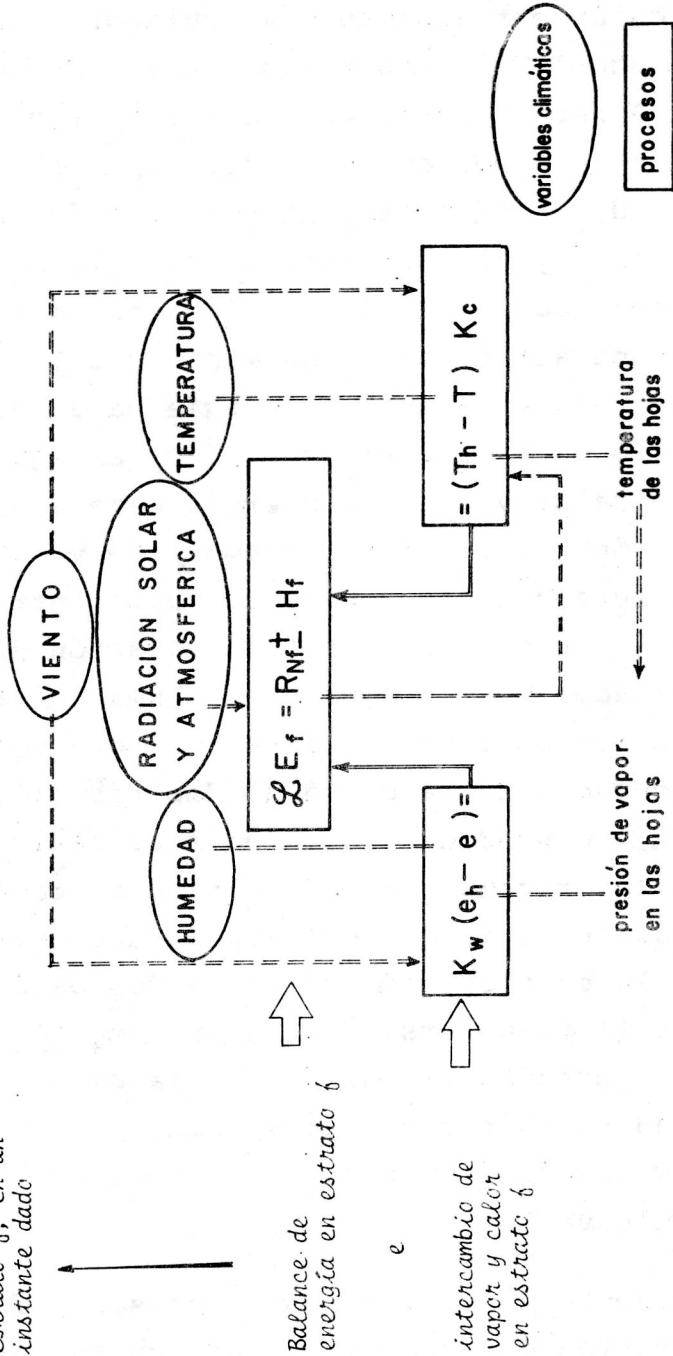
$$E = \int_{t_1}^{t_2} E_c dt = \int_{t_1}^{t_2} \int_c E_f d\delta dt$$

transpiración total del cultivo en un periodo dado, t_2-t_1

$$E_c = \int_0^F E_f d\delta$$

transpiración del cultivo en un instante dado (intensidad)

transpiración de las hojas en el estrato δ , en un instante dado



Balace de energía en estrato δ

intercambio de vapor y calor en estrato δ

temperatura de las hojas

presión de vapor en las hojas

Figura 8. Esquema de interpretación agrofísica de la transpiración máxima de los cultivos (explicación en el texto).

y calor están estrechamente vinculados. Cuando estos procesos están en equilibrio las hojas tienen una determinada temperatura, T_h . A esta temperatura está asociado un determinado valor de presión de vapor en las hojas, e_h (Tabla 1). El intercambio de calor, H_f , está promovido por la diferencia de temperatura entre las hojas y el aire circundante, T ; si T_h es mayor que T , el follaje cede calor al aire y el signo de H_f en el balance de energía es negativo; si T_h es menor que T , el aire cede calor a las hojas y aumenta así la energía para evaporar agua, cambiando el signo de H_f a positivo; si T_h es igual a T , no hay intercambio de calor y toda la energía para evaporar es provista por la radiación neta. El intercambio de vapor, E_f , es promovido por la diferencia de presión de vapor entre las hojas, e_h , y el aire que las rodea, e . La transpiración de la vegetación en un instante dado, E_c , es igual a la suma de la transpiración de cada uno de los estratos foliares, f , que componen el cultivo. Como consecuencia de la desigual distribución de la influencia atmosférica, se produce una marcada estratificación en el reparto del agua vaporizada dentro de la cubierta vegetal (Figura 9). La transpiración total del cultivo durante cierto período, E , resulta de la contribución variable de los diferentes estratos foliares en el transcurso del tiempo, t . A esta transpiración, se une la evaporación de agua desde la superficie del suelo, cuya intensidad también está determinada por los intercambios de radiación y los fenómenos aerodinámicos que se establecen en la base del cultivo.

Evidentemente, las mismas causas y factores que promueven la evaporación de agua libre, actúan en los suelos húmedos y en los cultivos produciendo la evapotranspiración. Son fenómenos *cualitativamente* semejantes. Por eso, se encuentra a menudo una estrecha proporcionalidad entre la evaporación, medida por ejemplo en un evaporímetro estandar, E_v , y la evapotranspiración de un cultivo bien provisto de agua, ET_x , (Figura 10). Pero, los

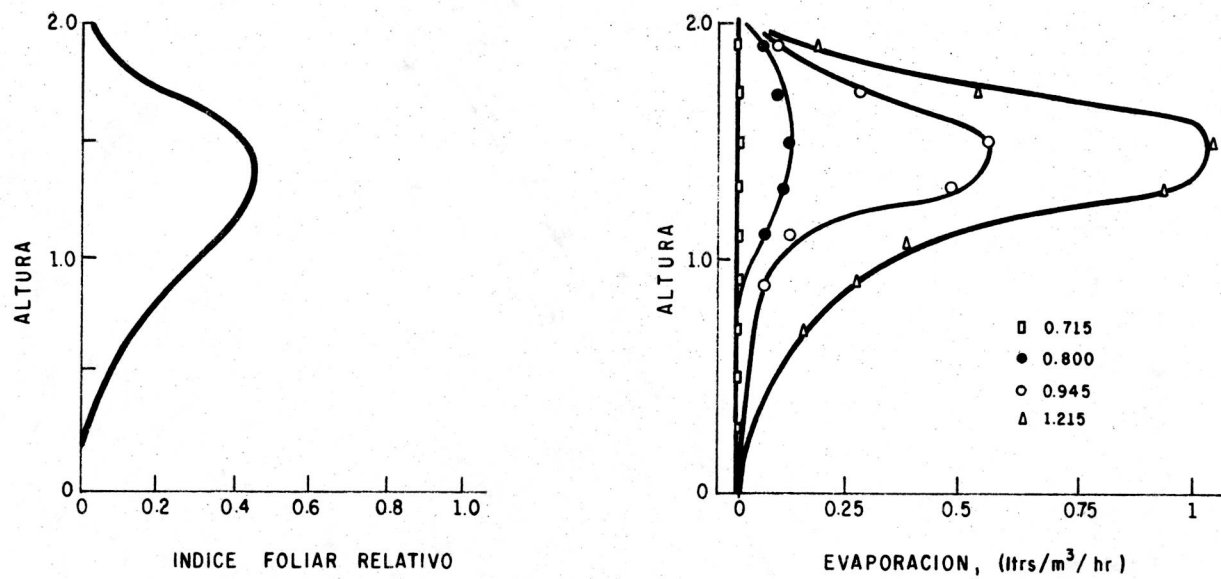


Figura 9. Distribución del área foliar y transpiración en una cubierta de mijo en diversos momentos del día.

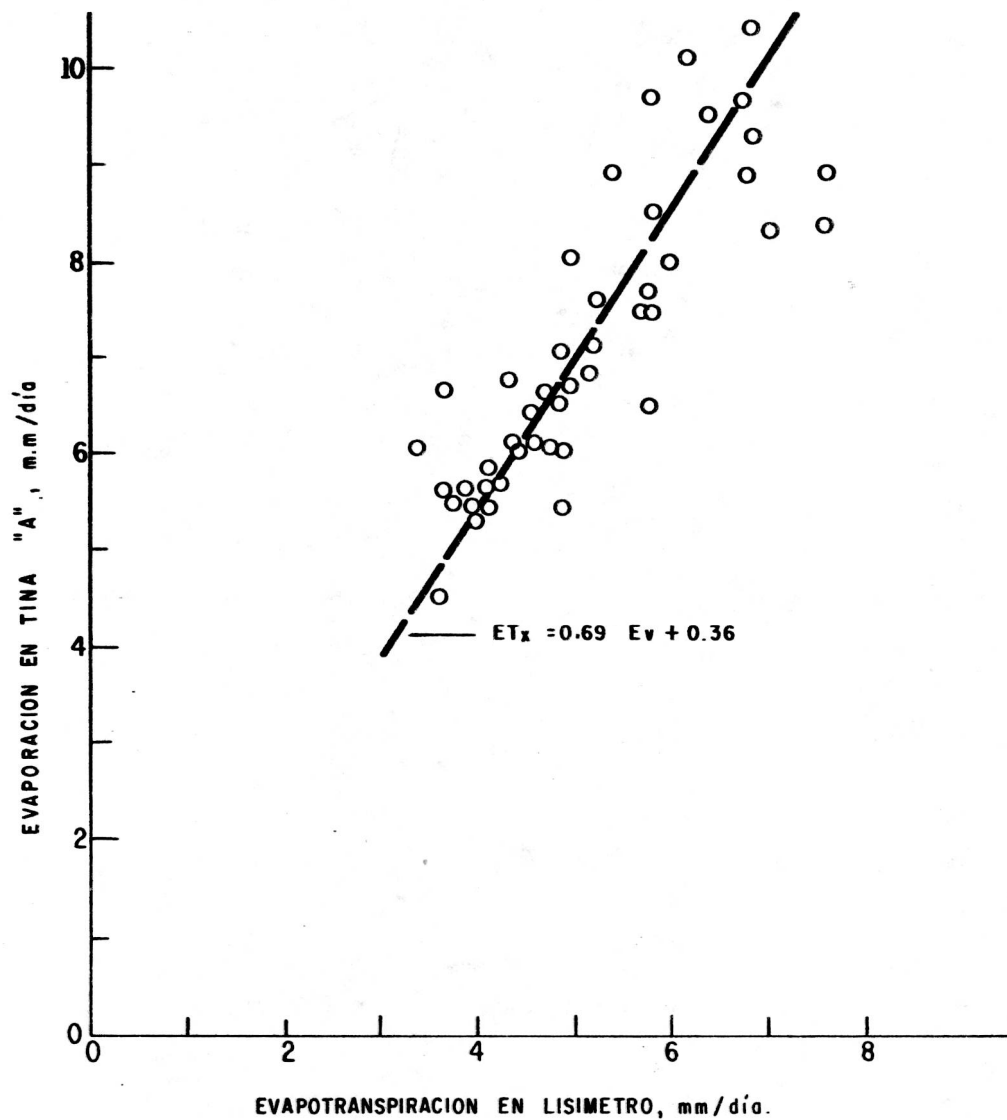


Figura 10. Relación entre evapotranspiración de grama raigras y evaporación de tina.

efectos del clima en la vegetación son *cuantitativamente* diferentes que en un evaporímetro, y el factor de proporcionalidad entre ambos varía al cambiar el tipo de evaporímetro (Figura 3.b) o las características ecofisiológicas de la vegetación (Tabla 2). En cultivos anuales, la evolución del follaje y los cambios en la cobertura del terreno producen una típica variación en la proporcionalidad ET_x/E_v (Figura 11).

La evapotranspiración máxima o demanda efectiva de agua de los cultivos alcanza sus mayores valores con vegetación alta, frondosa y oscura en días largos luminosos, despejados, calurosos, secos y ventosos. En estos casos la evaporación diaria alcanza valores de 8 a 12 mm/día, o más. Los valores mínimos se registran en cultivos bajos, ralos, de colores claros en días cortos, nublados, fríos, húmedos y calmos. En estas condiciones la evaporación es normalmente inferior a los 3 mm diarios.

Los *lisímetros* son aparatos destinados a medir la evaporación de agua en un suelo cultivado. Los hay de diferentes diseños y grados de complejidad (Figura 12). Los más precisos detectan pérdidas de sólo centésimos de milímetros en períodos inferiores a una hora. En esencia, consisten en bloques aislados de suelo, contenidos en recipientes donde es posible seguir el curso de la evaporación por diferencia de pesada, (lisímetros gravimétricos), por registros manométricos (lisímetros flotantes), o por balance hídrico (evapotranspirómetros). La pérdida de agua del lisímetro se ve muy afectada por la exposición del instrumento (Figura 13). Este debe representar fielmente el *fitoclima*, y para ello es preciso instalarlo con su superficie a ras del suelo, en medio del campo cultivado cuya evapotranspiración se pretende medir. Además, el desarrollo de las plantas en el lisímetro debe ser semejante al del cultivo que lo rodea (Figura 14).

TABLA 2. Relación entre evapotranspiración máxima y evaporación de tina standard (tomado de Chang, J.H. Climate & Agricultura. Aldine Pub. Co. 1968).

<u>Cultivo</u>	Relación ET_x/E_v			<u>Promedio</u>
	<u>Joven</u>	<u>Auge vegetativo</u>	<u>Maduración</u>	
Gramma				0.85
Gramma Bermuda	0.45	0.75		
Gramma	0.50	0.80-1.00		0.90
Alfalfa	0.50	1.05		
Alfalfa-Bromo				1.00
Alfalfa-Trébol				0.80-1.0
Cebada	0.25	0.90		0.30
Sorgo	0.30	1.15		
Algodón	0.20	0.85	0.10-0.40	
Maíz	0.27	0.90	0.40	
Caña de azúcar	0.40	1.10	0.98	

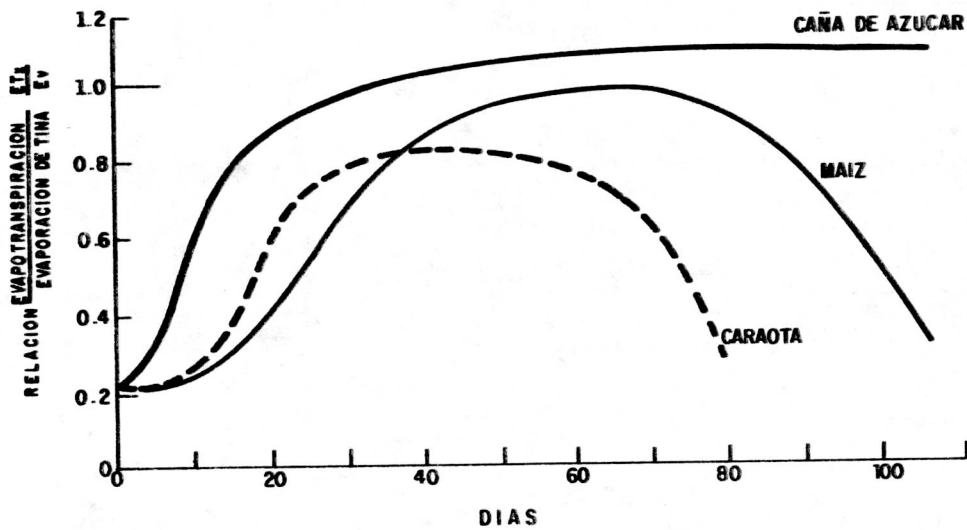
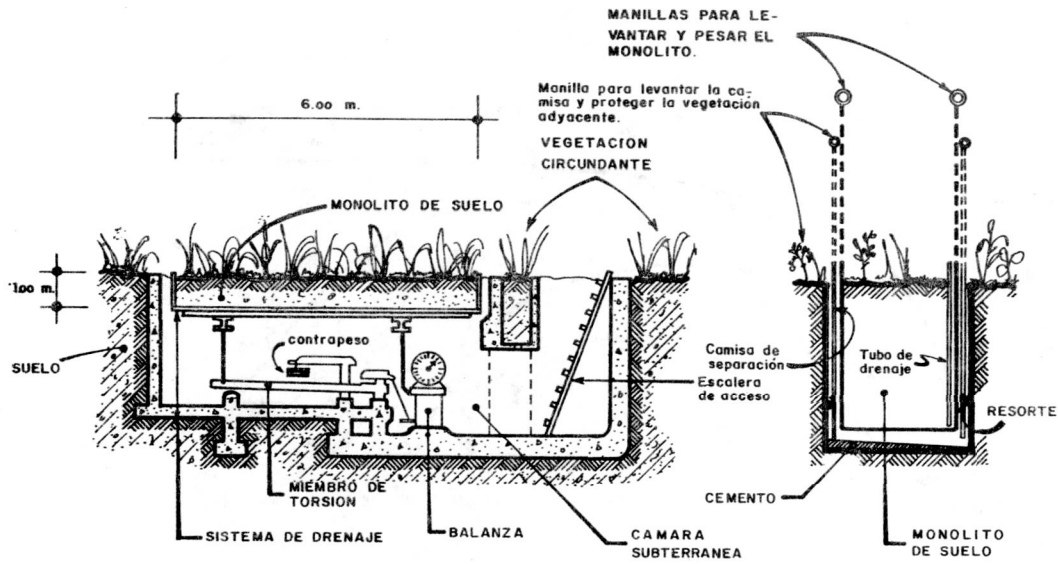
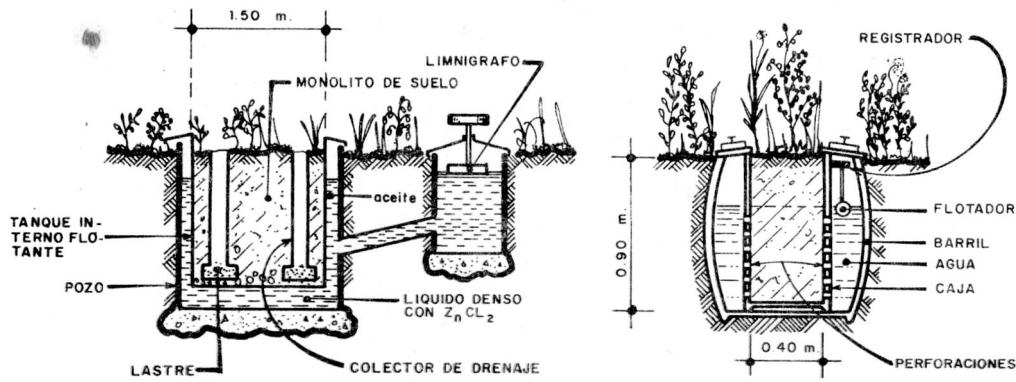


Figura 11. Variación estacional de la relación ET_x en tres cultivos de diferente densidad foliar y altura.



(a).- PRUITT Y ANGUS

(b).- HAFEEZ Y HUDSON



(c).- MAC MILLAN Y PAUL

(d).- OSTROMEZCKI

Figura 12. Esquema de algunos lisímetros : (a) y (b) de pesada; (c) flotante, y (d) evapotranspirimetro.

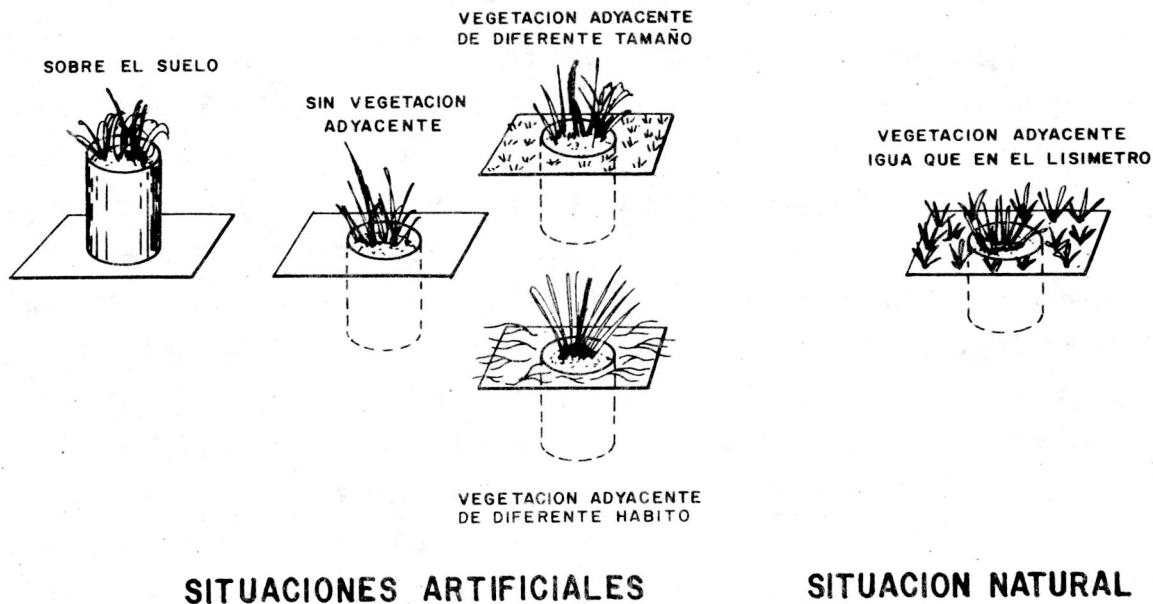


Figura 13. Condiciones de instalación de lisímetros.

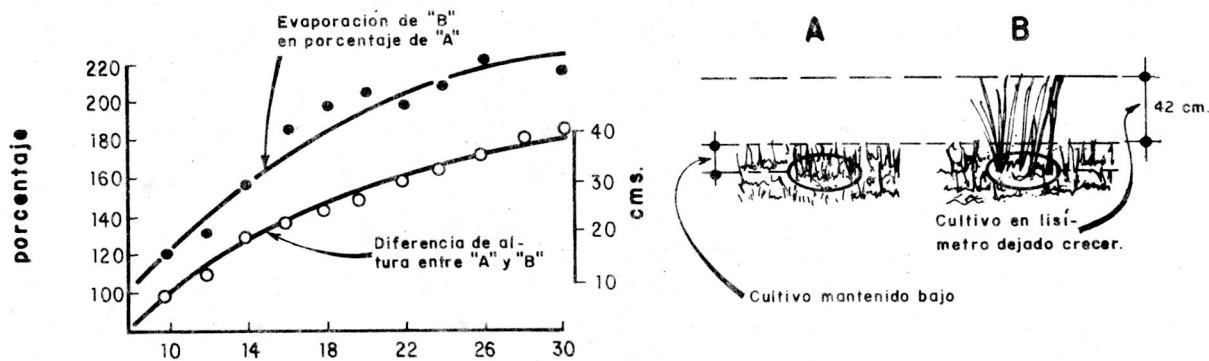


Figura 14. Efecto de la diferencia de altura entre vegetación del lisímetro y circundante en los valores relativos de e vapotranspiración.

2.3 EL SUELO como proveedor de agua.

Un suelo puede retener entre 1200 y 4400 m³ de agua por hectárea en los 80 cms. superiores del perfil, después que ha sido copiosamente humedecido, ha escurrido el excedente superficial y ha cesado la percolación profunda. La vegetación usa sólo una parte de este agua, y cuando cesa de extraerla el suelo puede aún contener entre 560 y 2400 m³ por hectárea hasta 80 cms. de profundidad. El aprovechamiento en esas condiciones fluctúa entre 640 y 2000 m³. Si la profundidad del suelo es menor, o el enraizamiento del cultivo es más superficial, el agua utilizada es comparativamente menor. Las primeras cifras se refieren a la *capacidad de campo*, las segundas al *punto de marchitamiento definitivo* y las últimas, a la *humedad aprovechable*, expresadas en volumen por hectárea. Corrientemente se expresan como *lámina* (volumen/área), o bien en términos relativos *volumétricos* (volumen de agua/volumen de suelo) o *gravimétricos* (peso de agua/peso de suelo). En el primer caso, las láminas en la profundidad indicada corresponden respectivamente a los valores siguientes: 12 a 44 cms, 5,6 a 24 cms. y 6.4 a 20 cms. En el segundo caso, donde el volumen de suelo es 10000 m² x 0.8 m = 8000m³, las expresiones volumétricas equivalentes son: 0.15 a 0.55 ^{1/}; 0.07 a 0.30, y 0.08 a 0.25 m/m (o cm/cm). La expresión gravimétrica se obtiene dividiendo las cifras volumétricas por la densidad del suelo. Por ejemplo, si la densidad promedio del suelo en los 80cm. considerados es 1.4 los respectivos valores gravimétricos son: 0.11 a 0.39 ^{2/}; 0.05 a 0.21, y 0.06 a 0.18 grs/grs. Los principales parámetros edáficos asociados a las características de retención hídrica del suelo son la textura, la densidad y el contenido de material orgánico. La Figura 15 muestra una relación generalizada entre la textura del suelo, determinada por

$$\frac{1/}{\text{por ej.}} \quad \frac{1200 \text{ m}^3}{8000 \text{ m}^3} = 0.15$$

$$\frac{2/}{\text{por ej.}} \quad \frac{0.15}{1.4} = 0.11$$

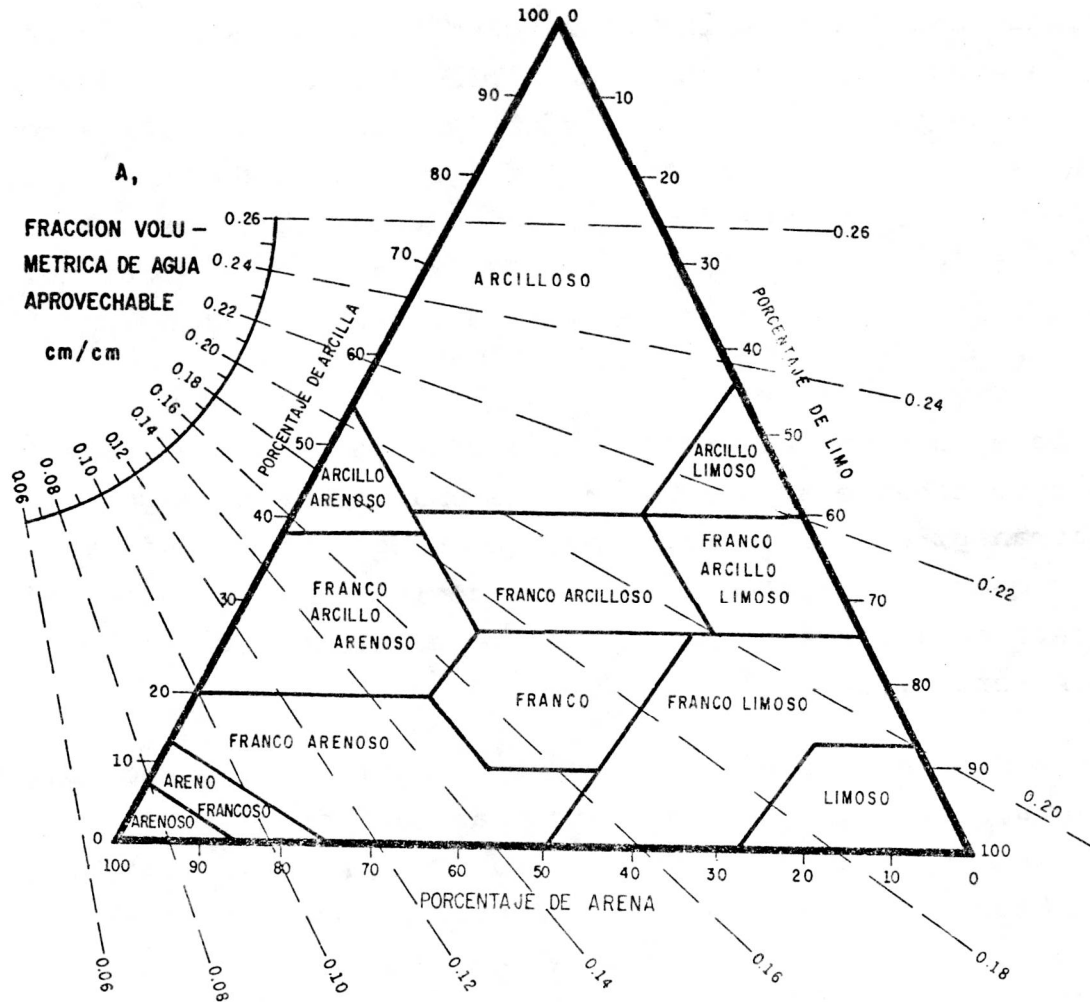


Figura 15. Relación entre la fracción volumétrica de agua aprovechable en el suelo y su textura.

análisis mecánico y la fracción volumétrica de agua disponible para la evapotranspiración. Multiplicando este valor por la profundidad de suelo enraizado, se obtiene una estimación aproximada de la lámina aprovechable. Por ejemplo, en 50 cms. enraizados de un suelo franco, cuya fracción volumétrica es 0.17 cm/cm, habrían $50 \times 0.17 = 8.5$ cms (ó 0.085 m) de agua disponible. Este valor corresponde a un volumen de $0.085 \times 10\ 000\ m^2/ha = 850\ m^3$ por hectárea.

Ha sido habitual en el pasado considerar que el consumo del agua aprovechable se hace siempre a una intensidad igual a la evapotranspiración máxima. Hoy se sabe que eso no siempre ocurre, y que la tasa efectiva de extracción de agua depende de la interacción de factores climáticos, edáficos y vegetales. (Taylor y Ashcroft, 1972).

La Figura 16 explica el nuevo concepto de aprovechamiento del agua, por una analogía hidromecánica (Norero, 1976 a):

- (a) El envase S tiene cierta capacidad total, A, para almacenar agua. Esta corresponde al volumen poroso total del suelo, o contenido de agua en condiciones de saturación.
- (b) Sólo una parte de esa capacidad queda retenida por suficiente tiempo para considerarse efectivamente almacenada, B. Esta es la humedad remanente una vez que ha percolado o se ha redistribuido una cierta cantidad hacia estratos profundos (capacidad de campo).
- (c) A su vez, no todo el agua efectivamente retenida puede ser extraída por el sistema de bombeo, C, y tuberías, D. La bomba es de acción variable y el sistema de tubos comprende un conjunto de conductos cuyo diámetro y profundidad varían progresivamente: los más cortos y anchos, F, con mayor conductividad, extraen los primeros volúmenes al accionar la bomba; los más profundos y angostos, G, con mayor resistencia al flujo, extraen los últimos volúmenes de agua. El volumen total aprovechable depende del nivel del tubo más fino. El sistema de extracción,

SUSTRACCION DE AGUA

ADICION DE AGUA

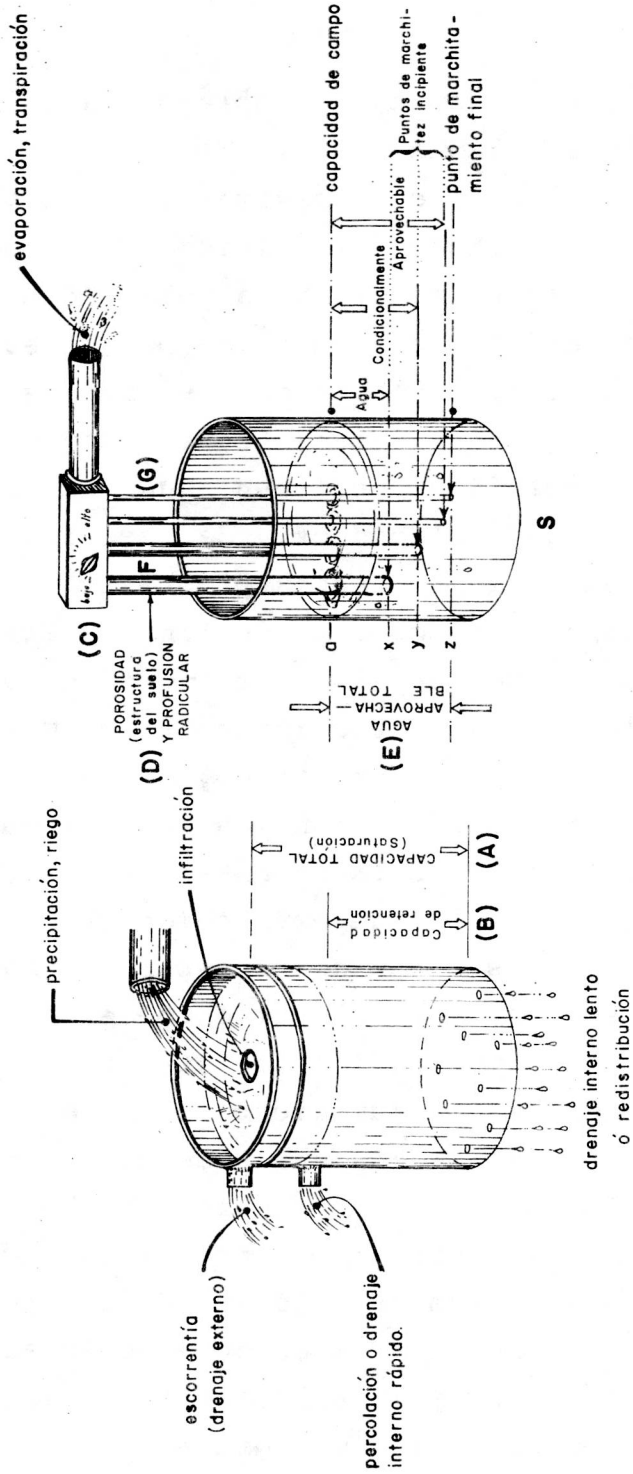


Figura 16. Concepto intuitivo de movimientos y retención de agua en el suelo.

bomba y tuberías, representa el complejo evapotranspirante y transmisor atmósfera-planta-suelo. El accionar variable de la bomba es la evapotranspiración máxima; la tubería es la red porosa del suelo y las raíces del cultivo. La progresión de tubos de diferentes tamaños se asocia a la relación entre el potencial hídrico y la cantidad de agua retenida por el suelo (curva característica de retención): los poros más gruesos retienen débilmente el agua y la ceden prontamente; su conducción hidráulica es máxima. Los poros finos retienen agua con gran tenacidad, la ceden con dificultad y su conductividad es mínima. Sometido a una extracción, el suelo se deseca progresivamente en el orden decreciente de poros gruesos a poros finos. El nivel del tubo más fino simboliza entonces el contenido de humedad, o potencial hídrico, al cual la extracción se hace imperceptible. Es el punto de marchitamiento definitivo.

(d) Las características operacionales del sistema hidromecánico son las siguientes: (1°) si la bomba acciona lentamente (baja demanda evaporadora), la tasa de extracción es baja; toda la tubería (poros y raíces) es capaz de transportar agua a la velocidad requerida. En este caso, el agotamiento del agua procede uniformemente desde el nivel máximo de retención, a, hasta el nivel mínimo z, donde cesa abruptamente. (El agua aprovechable total, nivel a-z, es utilizada a una tasa constante e igual a la evapotranspiración máxima). (2°) si la bomba acciona con más rapidez, la tasa de extracción es inicialmente mayor que antes. Los primeros volúmenes son extraídos rápidamente por los tubos más gruesos. (La demanda evaporadora ha aumentado, la evapotranspiración máxima es mayor y es satisfecha inicialmente por las reservas hídricas de los poros más gruesos). Al llegar al nivel y, van quedando operantes los tubos cada vez más finos, que por su creciente incapacidad de transmitir agua a la velocidad requerida, restringen gradualmente la extracción. Así se alcanza el nivel z donde la resistencia al flujo es tan grande que la contribución de los conductores se hace despreciable en compara

ción al flujo inicial. (El suministro de agua de los poros gruesos se ha agotado pronto; después, entre los niveles de porosidad y y z , la insuficiente conductividad hidráulica restringe gradualmente la tasa de evapotranspiración por debajo de su valor máximo. Esta reducción se produce por el cierre parcial de los estomas, los cuales de este modo tienden a igualar las pérdidas de agua de las hojas con los escasos ingresos de las raíces. Es decir, al nivel y , se ha producido un *marchitamiento incipiente*. Cuando el sistema conductor se hace inoperante del todo, en el nivel z , se produce el *marchitamiento definitivo*).

3°) si la bomba es acelerada aún más sólo los tubos más anchos y conductores satisfacen las exigencias de mayor flujo. Pero estos conductos quedan inoperantes en menor tiempo, alcanzan prontamente un nivel x a partir del cual se establece un flujo restringido, y se hace superflua la contribución de un mayor número de tubos finos. (La demanda atmosférica es intensa; la evapotranspiración se mantiene por poco tiempo a su máxima intensidad, hasta alcanzar el nivel de porosidad x . Se produce antes el *marchitamiento incipiente*, el cual se acentúa progresivamente hasta hacerse definitivo en z).

En el aprovechamiento del agua almacenada se destacan entonces dos regímenes de extracción (Figura 16): (a) un régimen inicial, cuya tasa equivale a la evapotranspiración máxima. Su intensidad está limitada por los factores que influyen en el flujo del agua como vapor desde las hojas; y (b) un régimen posterior, cuya tasa es inferior a la máxima, y donde el aprovechamiento está restringido o limitado por los factores que afectan el flujo del agua al estado líquido en el suelo y raíces. La humedad o potencial hídrico al cual se produce el cambio del primero al segundo régimen depende del balance entre la demanda evaporadora de las hojas (salida) y la oferta de agua de las raíces (entrada). La demanda está representada por la evapotranspiración máxima (Figura 17). La oferta está determinada por el

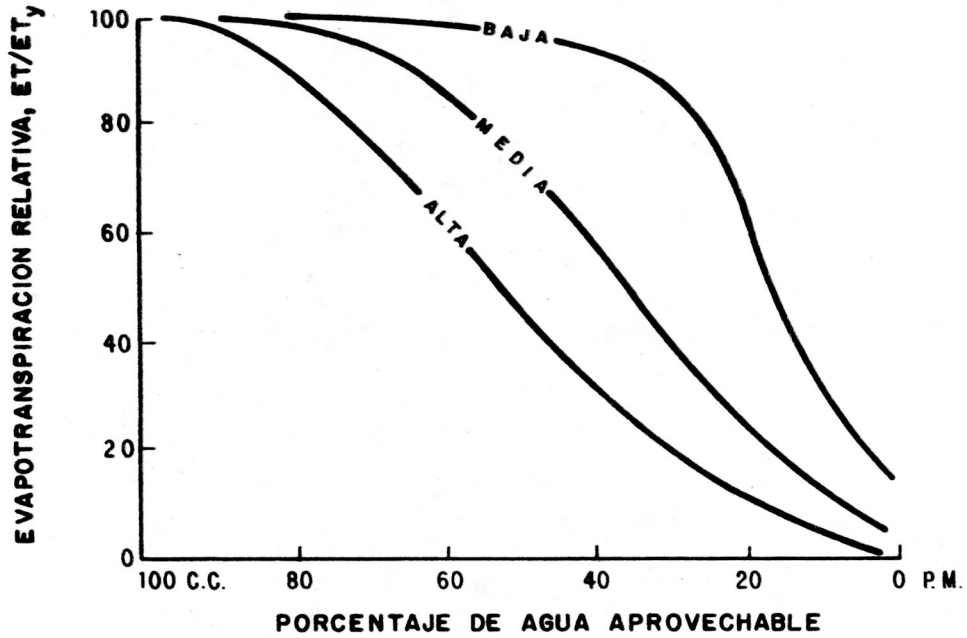


Figura 17. Utilización del agua aprovechable según la demanda evaporadora de la atmósfera.

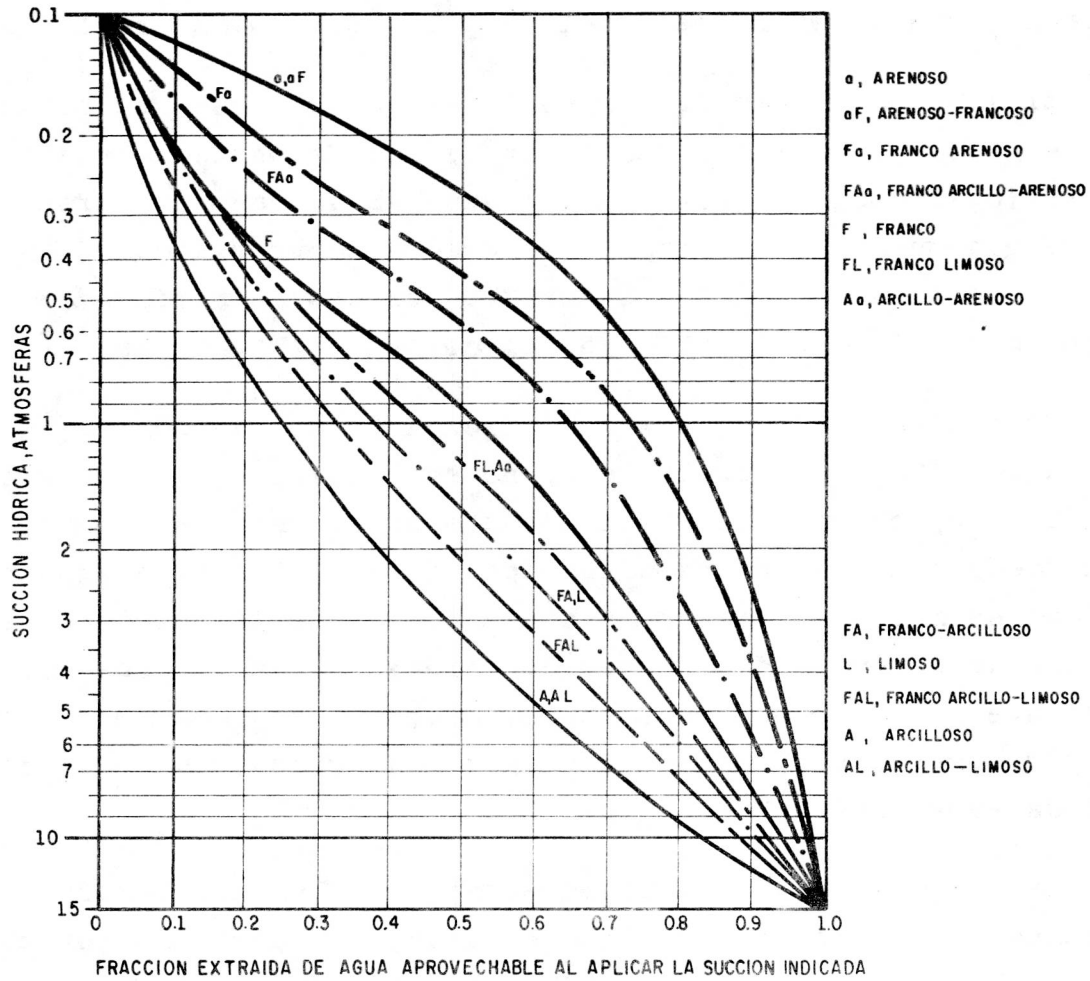


Figura 18. Relación entre la fracción de agua aprovechable extraída y la succión aplicada al suelo, en función de la textura.

volumen del suelo enraizable, las características de retención hídrica y transmisoras del suelo y por la profusión radicular.

El sistema poroso de los suelos arenosos posee un predominio de poros gruesos que desalojan el agua a bajas tensiones. En cambio los suelos arcillosos poseen en su mayoría poros medianos y pequeños que liberan más gradualmente el agua (Figura 18). La influencia de la textura es por eso un factor determinante en el régimen de utilización del agua (Figura 19).

Es evidente que si las condiciones de extracción de agua son suaves (baja evaporatividad) no se requieren muchas raíces ni poros muy conductores para satisfacer la demanda. Pero, también puede imaginarse una situación en la cual una severa evaporación es mantenida por un sistema poroso deficiente. En efecto, una gran densidad o número de raíces puede interceptar profusamente la red porosa del suelo, acortar así el circuito del agua y contrarrestar, en conjunto, la baja conductividad individual de esos poros (Figura 20).

Las Figuras 17, 19 y 20 muestran que el marchitamiento incipiente, y el uso restringido del agua, comienza a mayor contenido de humedad (o menor succión) cuando: (a) la evapotranspiración máxima es alta; (b) el enraizamiento es poco denso, y (c) el suelo es de baja conductividad capilar (textura arenosa o suelos deficientemente estructurados).

Fisiológicamente, el uso restringido del agua del suelo es normalmente desfavorable al desarrollo y producción vegetal (Figura 21). La óptima provisión de agua es aquella que mantiene en el suelo el nivel de humedad sobre el punto de marchitamiento *incipiente*. En el riego técnico ha sido tradicional adoptar un valor de agotamiento del 50% del agua total aprovechable, para asegurar esa condición. No obstante, por lo expuesto antes, es evidente que existen circunstancias de clima, suelo y vegeta

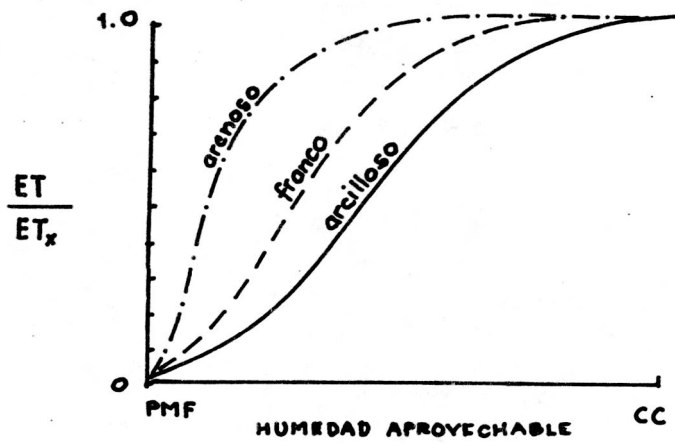


Figura 19. Relación típica entre la textura del suelo y la intensidad con que es utilizada el agua aprovechable.

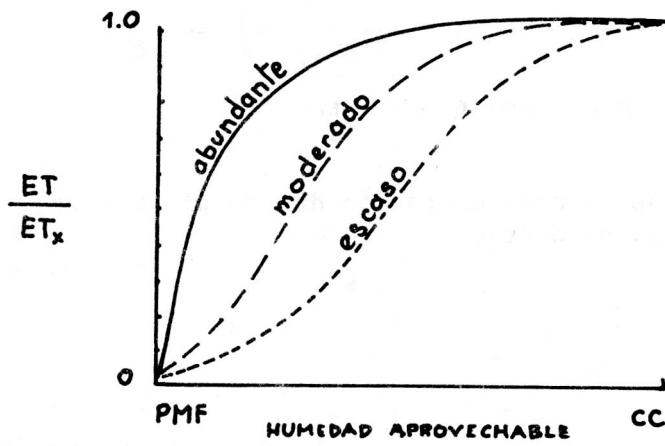


Figura 20. Relación típica entre la densidad de raíces y la intensidad con que es utilizada el agua aprovechable.

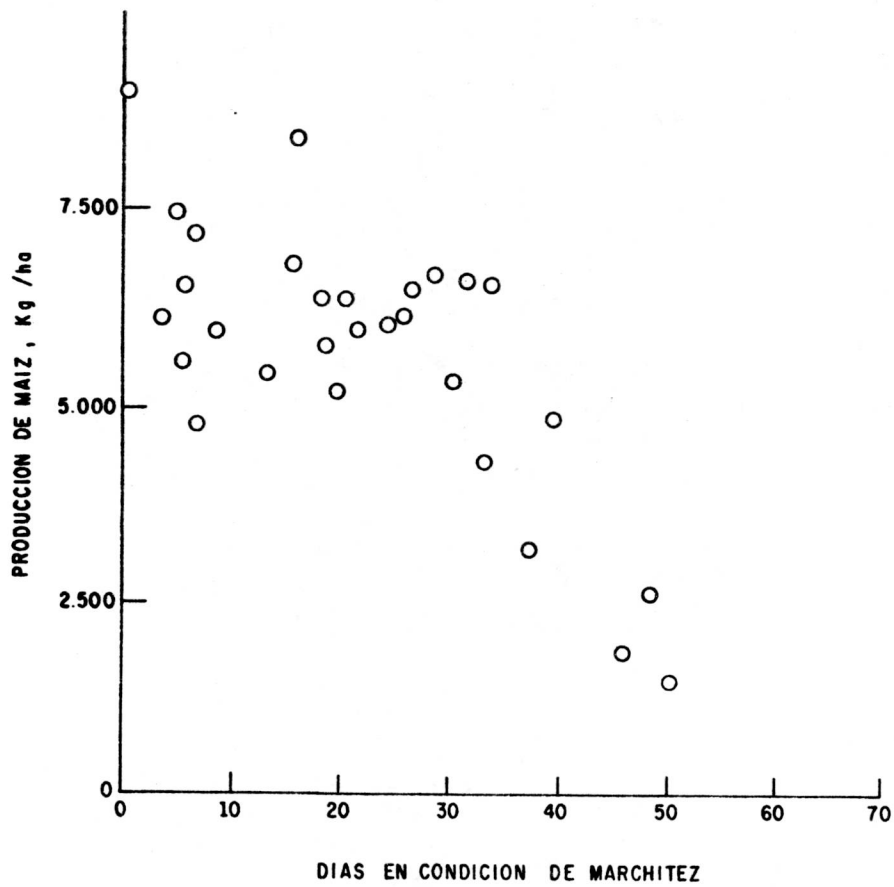


Figura 21. Efecto de la deshidratación de las plantas de maíz y su producción.

ción en las que esa convención resulta en una sobrestimación, y en otras en una subestimación, de las necesidades óptimas de agua (Norero, 1974).

3. APLICACIONES.

3.1 CALCULOS DEL RIEGO ASOCIADO A EVAPOTRANSPIRACION MAXIMA.

Cuando el agua es abundante y existen las facilidades adecuadas, el riego se planifica para mantener continuamente la turgencia en los cultivos y lograr así su óptimo desenvolvimiento fisiológico. En otros términos, para asegurar la evapotranspiración máxima durante todo el ciclo de desarrollo. Entre las determinaciones más importantes relacionadas con el riego fisiológico figuran: (a) frecuencia, (b) lámina a aplicar en cada oportunidad, (c) consumo total de agua, (d) nivel de humedad asociada al umbral óptimo de riego, (e) evapotranspiración máxima, etc. El riego técnico incluye además consideraciones de eficiencia y diseños de distribución, aplicación y conservación que son materias de la ingeniería hidráulica (Grassi, 1976 a y b).

3.1.1. Datos necesarios:

a) climáticos:

- (1°) evaporatividad atmosférica, E_v , por registros de tina estandar de evaporación
- (2°) precipitación, P , por registros pluviométricos.

b) fitotécnicos:

- (1°) duración del ciclo de desarrollo, en días, t_c .
- (2°) coeficiente de altura y frondosidad del cultivo, a . (Tabla 3) (Norero, 1976 c).

Tabla 3. Coeficiente de desarrollo foliar para el cálculo de la evapotranspiración máxima.

<u>Cultivos</u>	<u>Ejemplo</u>	<u>a</u>
muy frondosos, altos, de largo período vegetativo (>5 meses), o sembrados muy tupidos.	caña de azúcar, pasto elefante, sorgo forrajero, etc.	6.2
frondosos, de mediana estatura, de 3 - 5 meses de desarrollo.	maíz, sorgo granero, arroz, tabaco, algodón, yuca, tomate, etc.	4.8
poco frondosos, baja estatura, de rápido y corto desarrollo (3 meses), o sembrados muy separadamente.	carajota, maní, hortalizas bajas, frutales espaciados, etc.	3.4

(3°) coeficiente de enraizamiento, \underline{r} (Tabla 4).

Tabla 4. Coeficiente de densidad de enraizamiento, \underline{r} , para el cálculo del umbral óptimo de riego. (Norero, 1976 c).

<u>Característica radicular</u>	<u>Ejemplo</u>	<u>r</u>
muy profusas	gramíneas pratenses	0.7 - 1.0
profusas	maíz, sorgo, arroz, girasol	0.5 - 0.7
moderadamente densas	caña de azúcar, soya, algodón, maní	0.3 - 0.5
poco densas	papa, tabaco, hortalizas, banano	0.2 - 0.4

c) edáficos:

(1°) profundidad enraizable, R_x , si existen causas pedogenéticas que limitan las raíces a una profundidad inferior a la indicada en la Tabla 5.

Tabla 5. Zona radicular típica, que contribuye la mayor parte del agua aprovechable. (Adaptado con modificaciones, de Grassi, 1976).

<u>Tipo de suelo</u>	<u>Zona radicular, R_x, cms.</u>		
	a) Hortalizas, papas	b) Maíz, algodón, tabaco, sorgo, etc.	c) Alfalfa, pastos, arbustos
arenoso	40	65	80
franco arenoso	40	80	80
franco	50	80	100
franco arcilloso	35	70	80
arcilloso	20	40	60

(2°) densidad aparente, ρ ; obtenida de informes edafotécnicos, o estimada por textura (Figura 22).

(3°) agua aprovechable total; obtenido de informes edafotécnicos que suelen expresar el contenido gravimétrico, en porcentaje, de la capacidad de campo, W_c , y del punto de marchitamiento definitivo, W_m . La fracción volumétrica de agua aprovechable total se obtiene entonces por el producto

$$\frac{W_c - W_m}{100} \times \rho$$

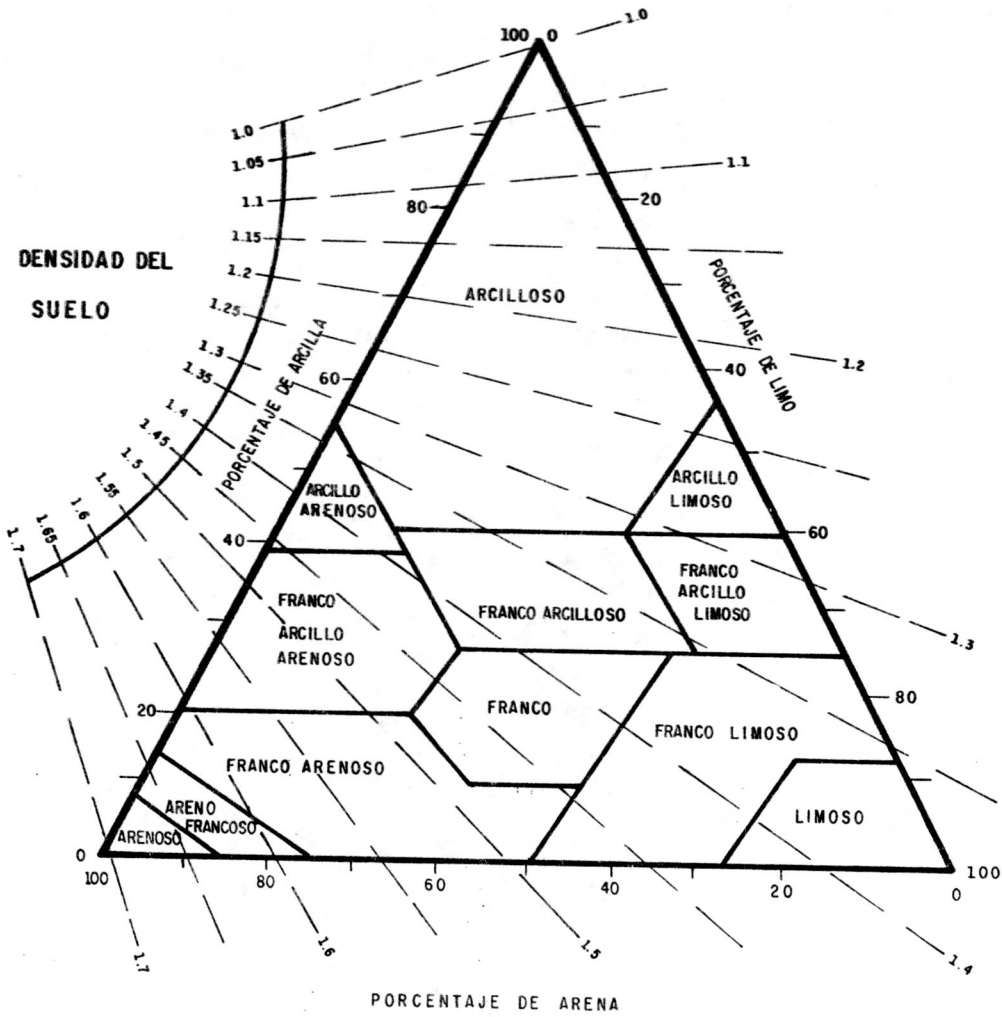


Figura 22. Relación entre densidad aparente del suelo y su textura.

También se puede obtener aproximadamente por textura (Figura 23).

(4°) Coeficiente hidrodinámico del suelo, \underline{s} , que depende de la textura (Figura 24).

3.1.2. Ejemplo 1.

Calcular las necesidades de riego de un cultivo de maíz en un suelo franco, sembrado el 1° de Diciembre; con la siguiente información: (a) evaporación de tina estandar, $\underline{E_v}$, y (b) precipitación, \underline{P} , promedios, distribuidas así:

mes:	diciembre,	enero,	febrero,	marzo
$\underline{E_v}$, mm/día	6.0	6.7	7.8	9.0
\underline{P} , mm/mes	27	18	4	14

(c) duración del ciclo de cultivo, $\underline{t_c}$, 120 días; (d) coeficiente foliar (ver Tabla 3), $\underline{a} = 4.8$; (e) coeficiente de enraizamiento (ver Tabla 4), $\underline{r} = 0.60$; (f) profundidad típica de enraizamiento sin impedimento pedogenético (ver Tabla 5), $\underline{R_x} = 80$ cms; (g) densidad aparente, $\underline{\rho} = 1.45$; capacidad de campo, $\underline{W_c} = 25\%$; y punto final de marchitamiento, $\underline{W_m} = 13\%$. Por lo tanto, la fracción volumétrica de agua aprovechable, $A = (25-13) \times 1.45 : 100 = 0.17$ cm/cm. (h) coeficiente hidrodinámico del suelo (ver Figura 24), $\underline{s} = 0.5$.

3.1.3. Procedimiento.

Los cálculos proceden y se disponen como se indica en la Tabla 6:

- 1°) se entran los datos de $\underline{E_v}$ y \underline{P} (hileras 1 y 2)
- 2°) se entra la duración del mes, \underline{N} , en días (hilera 3)
- 3°) se estima la profundidad enraizada promedio de cada mes, \underline{R} cms: (Noreno, 1976 c)

$$R = 1.8 \left(\frac{t}{t_c} \right) \left(1.50 - \frac{t}{t_c} \right) R_x$$

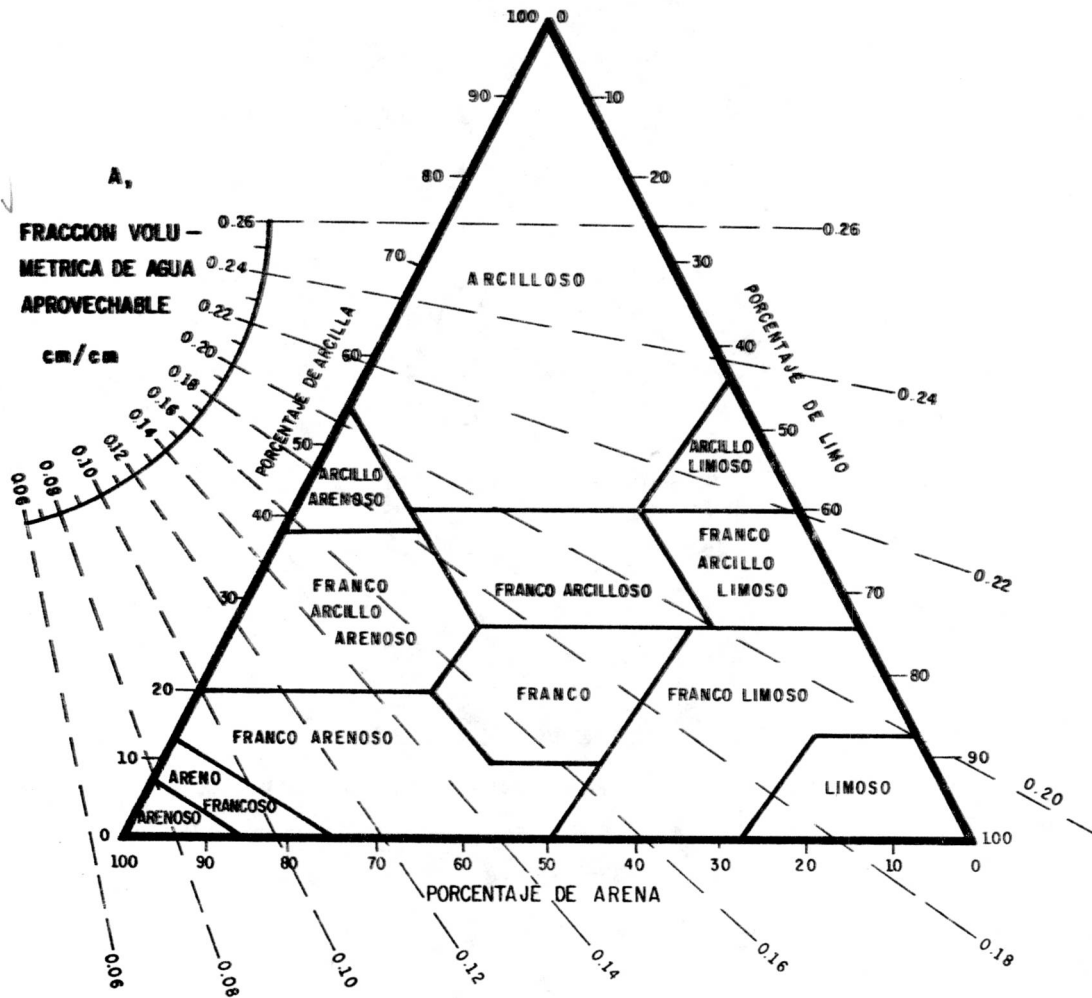


Figura 23. Relación entre la fracción volumétrica de agua aprovechable en el suelo y su textura.

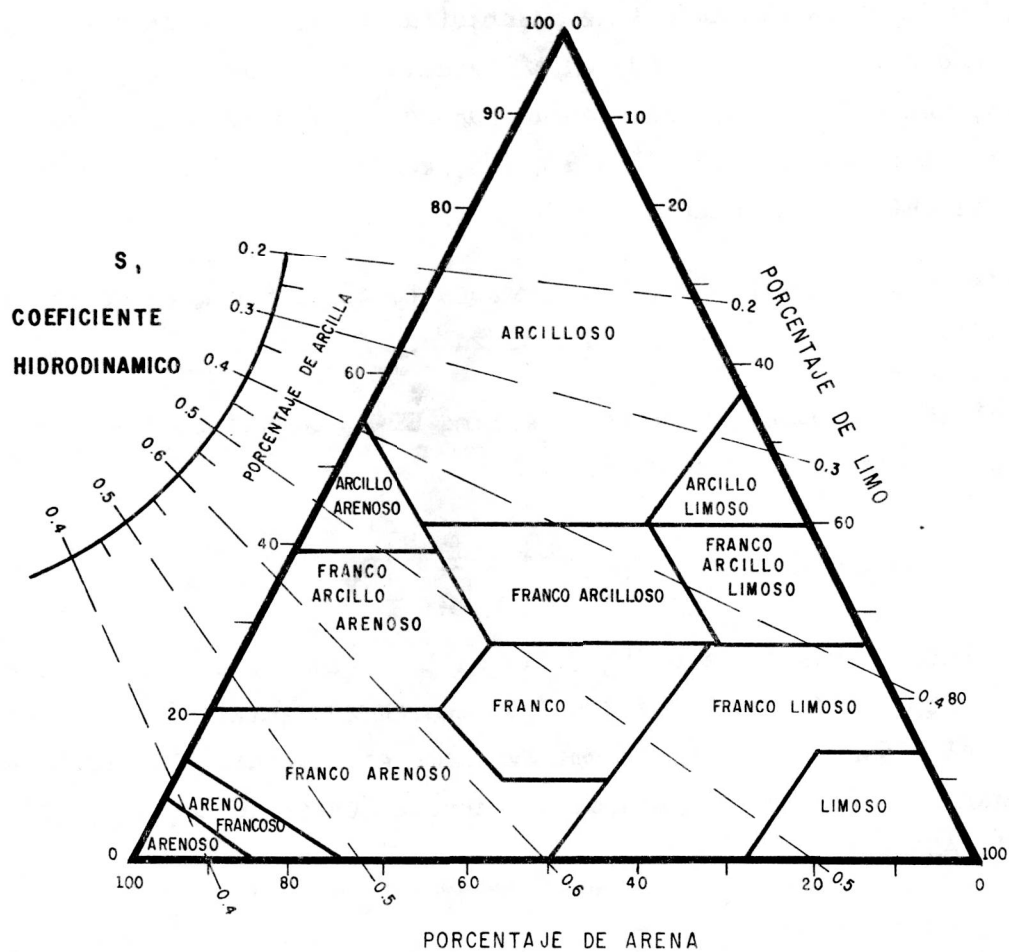


Figura 24. Relación entre el coeficiente hidrodinámico del suelo y su textura.

En el primer mes las raíces se desarrollan entre los días $t = 0$ y 30, en el segundo entre $t = 30$ y 60, en el tercero, entre 60 y 90 y durante el último mes, entre 90 y 120. Se adoptan por consiguiente, como equivalentes al promedio, los días $t = 15, 45, 75$ y 105 , respectivamente. El valor estimado de R se entra en la hilera 4.

4°) la lámina aprovechable total por mes es igual al producto de la fracción volumétrica por la profundidad enraizada, $L_A = A \times R$ (hilera 5)

5°) se calcula la evapotranspiración máxima ET_x , promedio mensual (Norero, 1976 c), y se entra en la hilera 6:

$$ET_x = \left[0.3 + a \left(\frac{t}{t_c} \right)^2 \left(1 - \frac{t}{t_c} \right) \right] E_v$$

Los valores promedios de E_v están en la hilera 1; los valores de a (Tabla 3) y t_c están dados (4.8 y 120, respectivamente); los valores de t son 15, 45, 75 y 105, respectivamente, como en el punto 3°. También puede estimarse el valor de ET_x por otros procedimientos (Grassi, 1968; Gutiérrez, 1975, ASAE, 1966)

6°) se determina el umbral de riego, U . Este es la fracción de la humedad volumétrica aprovechable que ya ha sido utilizada a la tasa máxima ET_x cuando se produce el marchitamiento incipiente $\frac{1}{2}$. La fracción aún disponible, pero a una tasa inferior a la evapotranspiración máxima es por lo tanto igual a $1 - U$: (Norero, 1976 b)

$$U = \sqrt[3]{r \cdot s \cdot (1 - ET_x)}$$

El valor de r y s (Tabla 4 y Figura 24) están dados (0.60 y 0.50, respectivamente); el de ET_x (cm/día) está calculado en la hilera 6. Los valores de U se entran en la hilera 7.

7°) la lámina utilizada a la tasa máxima ET_x , al producirse el marchitamiento incipiente, es igual al producto del umbral de riego por la lámina

$$\frac{1}{2} U = (\theta_c - \theta) / (\theta_c - \theta_m)$$

total aprovechable. Como este es el agotamiento permisible, al alcanzarse este punto deberá reponerse al suelo al menos una lámina igual. Por lo tanto la lámina de reposición, $L_R = U \times L_A$. Su valor mensual promedio se entra en la hilera 8.

8°) la necesidad neta mensual de agua es igual a la evapotranspiración máxima, total mensual $ET_x \cdot N$, menos los aportes de la precipitación, o sea $(ET_x \cdot N) - P$. (hileras 6, 3 y 2). El aporte de cada riego es L_R (hilera 8). En consecuencia para satisfacer esa necesidad el número teórico de riegos en cada mes, es, \underline{n} : (hilera 9):

$$n = \frac{(ET_x \cdot N) - P}{L_R}$$

9°) el número acumulado de riegos, n_{cum} , a lo largo del ciclo de cultivo, se entra en la hilera 10.

10°) La succión hídrica promedio en la zona de enraizamiento, a la cual se produce el marchitamiento incipiente $\underline{S_{crit}}$, se puede estimar aproximadamente con la Figura 18, entrando el valor del umbral de riego, U (hilera 7) en las abscisas. Las estimaciones se anotan en la hilera 11.

11°) La humedad promedio, en base gravimétrica, en la zona enraizada, desde la cual comienza a reducirse la evapotranspiración máxima, o a la cual debe idealmente regarse, W_R , se obtiene de la relación siguiente: (hilera 12)

$$W_R = W_c - \left(\frac{U \times A}{\rho} \right) \quad \text{cm/cm}$$

12°) Los valores de n_{cum} , L_R y $\underline{S_{crit}}$ se representan gráficamente, como en la Figura 25, A B y C. Se unen los puntos negros que representan los valores promedios mensuales calculados en la Tabla 6. La oportunidad o distribución de los riegos y los intervalos entre ellos se obtienen por interpolación (puntos blancos) en A. Las láminas de reposición de los riegos calculado en A, se obtienen por interpolación en B, y las correspondientes succiones críticas, por interpolación en C.

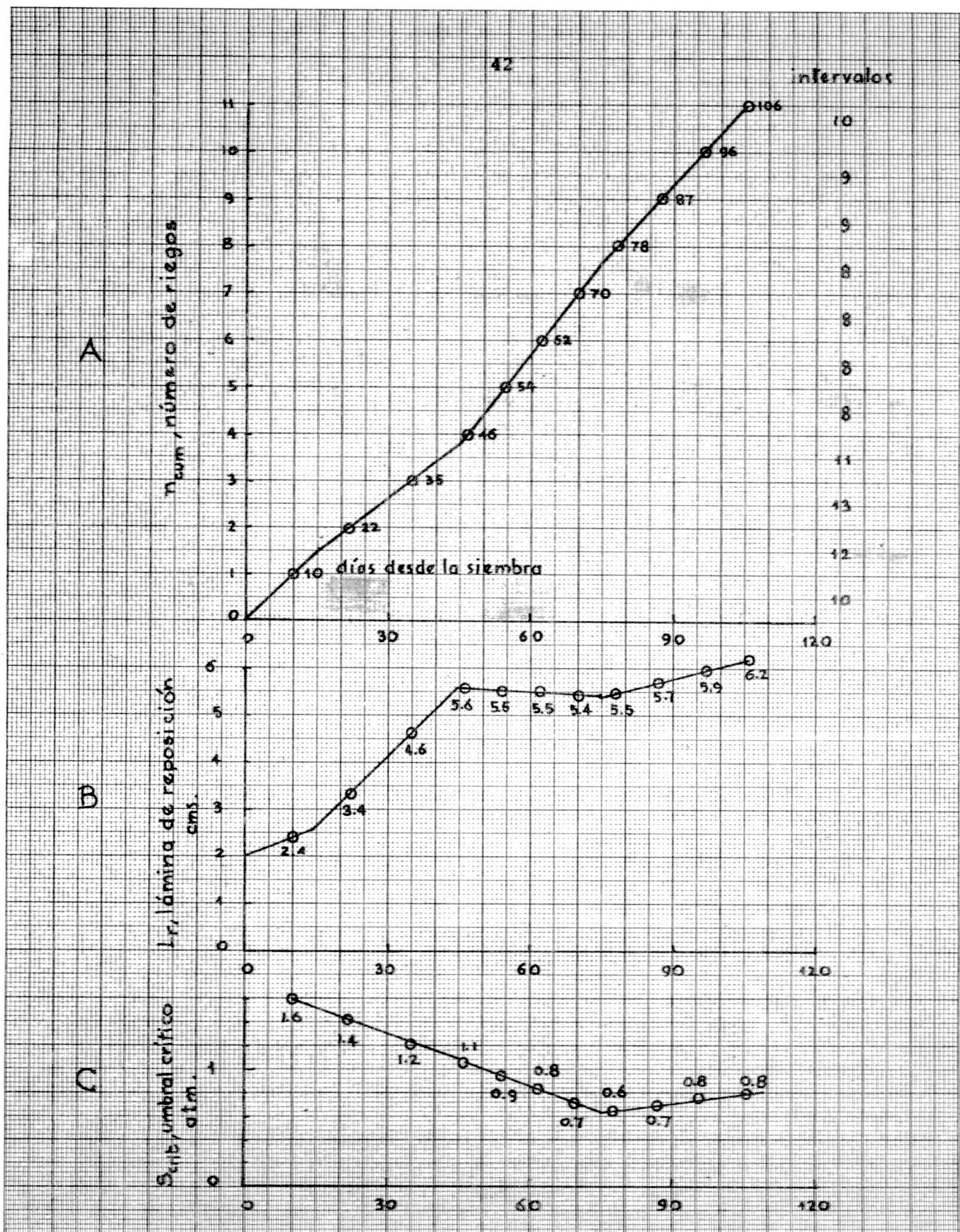


Figura 25. Representación gráfica de los resultados del cálculo de riego del ejemplo 1.

TABLA 6. Cálculo de las necesidades de riego en las condiciones del Ejemplo 1.

Hilera	Parámetros	Meses			
		Diciembre	Enero	Febrero	Marzo
Dados					
1	E_v , cm/día	0,60	0,67	0,78	0,90
2	P , cm/mes	2,7	1,8	0,4	1,4
3	N , días	31	31	28	31
Calculados					
4	R , cms	25	61	79	79
5	L_A cms	4.2	10.3	13.4	13.4
6	ET_x cm/día	0,22	0,48	0,78	0,68
7	U	0.62	0.54	0.40	0.46
8	L_r cm	2,6	5,6	5,4	6,2
9	n	1.5	2.3	3.9	3.2
10	n_{cum}	1.5	3.8	7.7	10.9
11	S_{crit} , atm.	1.5	1.1	0.65	0.8
12	W_r gr/gr	0.176	0.186	0.202	0.195

TABLA 7. Resultados de los cálculos de riego, en las condiciones del Ejemplo 1.

Orden del riego	Días desde la siembra	Intervalo en tre riegos	Lámina mínima de reposición	Tensión al momento del riego
		días	cms	atmósferas
		10		
1	10		2.4	1.6
		12		
2	22		3.4	1.4
		13		
3	35		4.6	1.2
		11		
4	46		5.6	1.1
		8		
5	54		5.5	0.9
		8		
6	62		5.5	0.8
		8		
7	70		5.4	0.7
		8		
8	78		5.5	0.6
		9		
9	87		5.7	0.7
		9		
10	96		5.9	0.8
		10		
11	106		6.2	0.8
Total: 11 riegos			55.7 cms (5570 m³/ha)	

13°) Los resultados de los cálculos del riego se presentan en la Tabla 7.

3.1.4. Comentarios:

El número de riegos estimados es 11. Se supone que ha habido además un riego de fondo antes de sembrar para asegurar la germinación y el establecimiento del cultivo. El último riego tal vez resulte superfluo porque el maíz está terminando la maduración del grano. La cantidad total de agua de riego estimada es $5570 \text{ m}^3/\text{ha}$. Este es un mínimo, puesto que debe ser incrementada (a) según la ineficiencia de distribución y aplicación (Grassi, 1976) y (b) si es necesario reducir o impedir la salinización (Reeve y Fireman, 1967). La etapa crítica hídrica del maíz coincide con la floración y fructificación, entre los 60 y 90 días (Salter y Goode, 1967). En el caso de ejemplo, esto supone regar cada 8 días con una lámina mínima de 5.5 a 5.9 cms., impidiendo que la succión supere las 0.6 a 0.8 atmósferas, o manteniendo la humedad entre 18 y 20% en la zona radicular (hilera 12, Tabla 6). La tensión puede controlarse con tensiómetros (Salazar, 1971) y la humedad por muestreo y pesada. El procedimiento propuesto es aplicable cuando no existe contribución de agua subterránea por ascenso freático.

3.2 CALCULO DEL RIEGO EN TURNOS FIJOS.

No siempre se cuenta con las facilidades para aplicar el agua en las oportunidades fisiológicamente adecuadas. Por el contrario, a menudo las entregas se hacen por turnos fijos. Si los turnos ocurren en períodos inferiores a los óptimos, es posible regar para sostener continuamente una evapotranspiración máxima. Si los turnos son más amplios que lo fisiológicamente recomendable, no es posible conseguir el crecimiento y producción potenciales del cultivo. En estos casos interesa al ingeniero estimar principalmente: (a) el agotamiento de humedad entre los turnos fijos de riego; (b) la lámina necesaria para re-

poner el agua consumida; (c) la evapotranspiración restringida, y (d) su relación con la evapotranspiración máxima. Con este último valor, puede estimarse aproximadamente la depreciación en productividad.

3.2.1. Datos necesarios:

Los mismos que en el caso anterior; además los de la Tabla 9.

3.2.2. Ejemplo 2.

Calcular las necesidades de riego de un cultivo de maíz en iguales condiciones a las del Ejemplo 1, excepto que el agua debe aplicarse cada 15 días. ¿Hasta qué humedad se deseca el suelo entre turnos? ¿Qué lámina mínima hay que reponer cada vez? ¿En qué grado se restringen las necesidades fisiológicas con ese régimen de riego? y ¿cuál es su posible incidencia en la productividad del cultivo?

3.2.3. Procedimiento.

La información necesaria y la disposición de los cálculos se muestran en la Tabla 8

1º) el intervalo óptimo del riego en cada mes, t_x , se obtiene dividiendo, la lámina óptima de agotamiento, L_r , (hilera 8, Tabla 6), por la tasa máxima de agotamiento, ET_x (hilera 6, Tabla 6)

$$t_x = \frac{L_r \text{ (cm)}}{ET_x \text{ (cm/día)}}$$

Los valores promedios mensuales de t_x se entran en la hilera 1, Tabla 8

2º) Cuando el turno de riego, t_r , no excede el lapso óptimo t_x , se ingresan a la Tabla 8 los valores correspondientes a la evapotranspiración máxima. En este ejemplo, el turno t_r excede t_x , es decir no es más favorable fisiológicamente.

3°) La humedad en el suelo al cumplirse el turno de riego, $\theta(t_r)$, es: (Norero, 1976 c)

$$\theta(t_r) = \theta_m + A (1-U) \exp \left[- \frac{U}{1-U} \left(\frac{t_r}{t_x} - 1 \right) \right] \quad \text{cm/cm}$$

El término θ_m es la humedad volumétrica al punto de marchitamiento definitivo, $\theta_m = \rho W_m$, y es un dato de entrada. En este ejemplo, $\theta_m = 1.45 \times 0.13 = 0.1885 \text{ cm/cm}$. A es la humedad aprovechable, volumétrica. En este caso, $A = 0.174 \text{ cm/cm}$. U , el umbral óptimo de riego, ya fue calculado (hilera 7, Tabla 6); t_r , el turno fijo de riego está dado en 15 días, y t_x , son los valores entrados previamente en la hilera 1, Tabla 8.

Si se prefiere expresar la humedad gravimétricamente, se divide $\theta(t_r)$ por la densidad, ρ : $W(t_r) = \frac{\theta(t_r)}{\rho}$ (hilera 3)

4°) La lámina por aplicar es por lo menos igual a la consumida entre riegos fijos, $L_r(t_r)$ suponiendo que cada vez se repleta a capacidad de campo:

$$L_r(t_r) = (\theta_c - \theta(t_r)) R \quad \text{cms.}$$

La profundidad de enraizamiento, R , fue calculada antes (hilera 4, Tabla 6). En este ejemplo, la humedad volumétrica o capacidad de campo, $\theta_c = \rho W_c = 1.45 \times 0.25 = 0.3625 \text{ cm/cm}$, y la humedad previa al riego, $\theta(t_r)$ está en la hilera 2.

5°) La evapotranspiración promedio entre riegos, $ET(t_r)$, es igual a la lámina consumida (hilera 4) dividida por el intervalo del riego, t_r :

$$ET(t_r) = \frac{L_r(t_r)}{t_r} \quad \text{cms/día}$$

Los resultados figuran en la hilera 5.

6°) El grado de restricción hídrica impuesto por el turno fijo está expresado por la relación entre ET (hilera 5) y ET_x (hilera 6, Tabla 6). Los valores de esta relación se entran en la hilera 6.

7°) Se representan gráficamente los resultados promedios de las láminas de reposición, entrando $L_T(t_T)$ en medio de cada período (mes) (Figura 26). Se unen estos valores (puntos negros) y por interpolación (puntos blancos) se obtienen las láminas de reposición de cada riego en turno fijo (A, Figura 26). La suma de todas estas láminas da el consumo de agua de riego; en este ejemplo, $3.1 + 5.0 + 6.8 + 7.4 + 8.0 + 8.2 + 8.4 = 46.9$ cms, ó 4 690 m³/ha.

TABLA 8. Cálculos en el riego por turnos fijos, en las condiciones del Ejemplo 2.

Hilera	Parámetros	Meses			
		Diciembre	Enero	Febrero	Marzo
1	t_x , días	12.10	11.74	7.05	9.15
2	$\theta(t_T)$, cm/cm	0.237	0.251	0.261	0.257
3	$W(t_T)$, gr/gr	0.164	0.173	0.180	0.177
4	$L_T(t_T)$, cms	3.10	6.77	7.98	8.33
5	$ET(t_T)$, cm/día	0.206	0.451	0.532	0.554
6	ET/ET_x	0.94	0.93	0.68	0.81

8°) La probable depreciación en productividad se puede estimar así: (a) se separan los efectos del riego en las etapas de vegetación y reproducción. En el maíz, la primera se cumple en los dos primeros meses. En este período la evapotranspiración relativa ET/ET_x fue estimada, en promedio, en 0.88 (88% de la máxima). La segunda etapa cubre los dos meses finales, en cuyo período la evapotranspiración relativa promedio fue $\frac{1}{2} (0.72 + 0.80) = 0.76$ (76%). (Tabla 8). (b) el crecimiento relativo de cada etapa, C/C_x , está relacionado aproximadamente con la evapotranspiración relativa, ET/ET_x , como sigue: (Norero, 1974 c).

$$\frac{C}{C_x} = \left[(1+c) \frac{ET}{ET_x} - c \right]^b$$

el coeficiente c expresa la proporción de la evapotranspiración proveniente del suelo (evaporación improductiva). La Tabla 9 indica sus valores típicos.

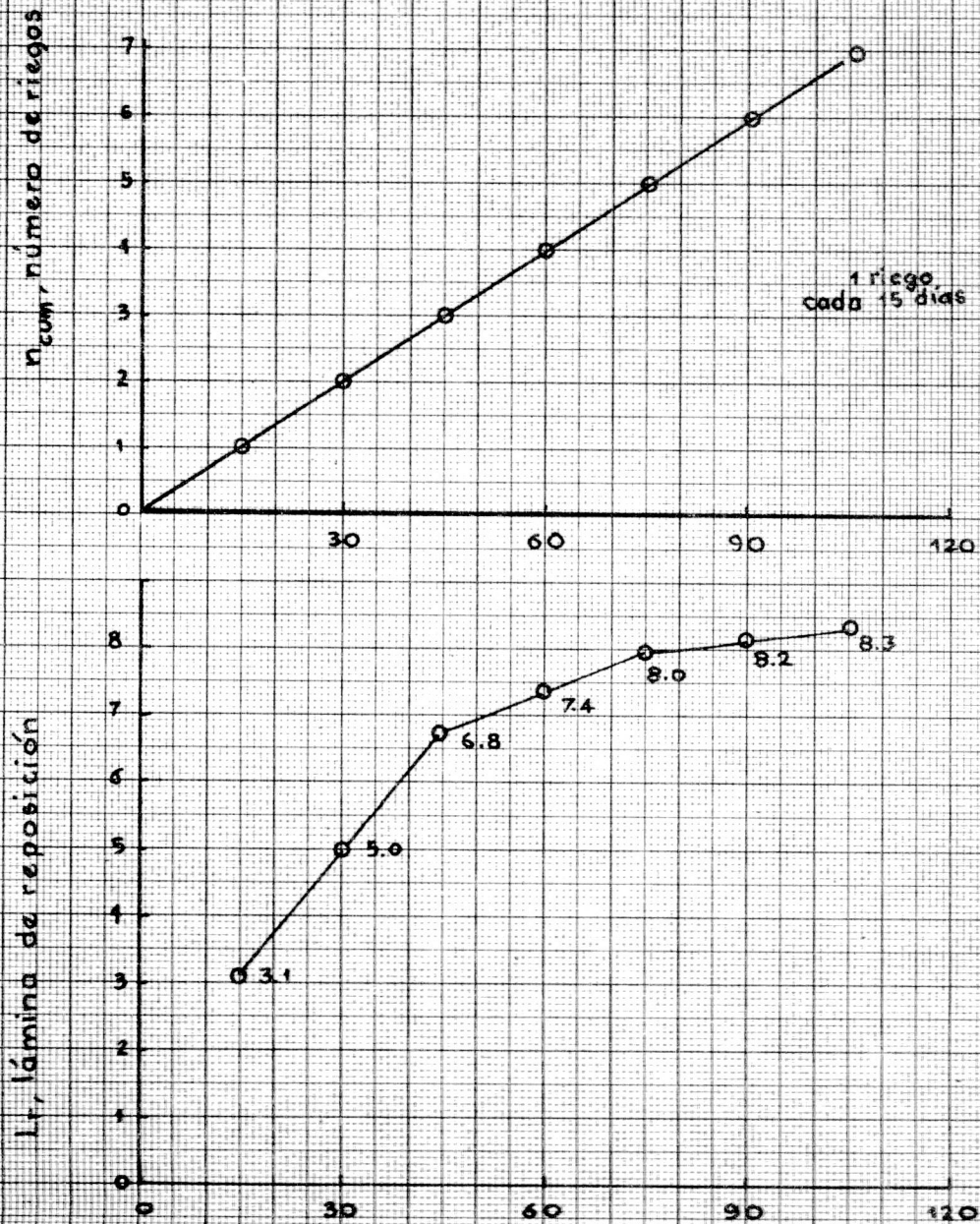


Figura 26. Representación gráfica de los resultados del cálculo de riego del ejemplo 2.

Para un cultivo normal de maíz, su valor es 0.3. El exponente b depende de la demanda máxima de agua del terreno cultivado, ET_x :

$$b = 0.25 + ET_x \quad (ET_x \text{ en cm/día})$$

El valor promedio de ET_x en la etapa vegetativa es $\frac{1}{2} (0.22 + 0.48) = 0.35$ cm/día (Tabla 6), por lo tanto $b = 0.60$. En la etapa de reproducción, ET_x es $\frac{1}{2} (0.78 + 0.68) = 0.73$, y $b = 0.98$.

(c) con estos valores de \underline{c} y \underline{b} , el crecimiento vegetativo es

$$\left(\frac{C}{C_x}\right)_v = [1.3 (0.935) - 0.3]^{0.60} = 0.95$$

es decir, con turno fijo de riego, la masa vegetativa (raíces, hojas, tallos) del maíz es estimada en un 90% del crecimiento que se obtendrá con el riego fisiológico. El crecimiento reproductivo (granos) relativo es:

$$\left(\frac{C}{C_x}\right)_g = [1.3 (0.747) - 0.3]^{0.98} = 0.68$$

El valor 0.68 significa que la masa de granos es el 68% de lo obtenible si no hubiera existido déficit hídrico (reducción en ET). Si no hubiese ocurrido previamente depreciación vegetativa, éste sería el valor definitivo de la producción relativa de granos. Pero, si hay un déficit precedente durante el desarrollo foliar, éste repercute sobre la producción final de granos. Son las hojas las que aportan las sustancias orgánicas para el tratamiento del fruto, y su efecto es multiplicativo (Hall y Dracup, 1970). De manera que con el turno fijo de riego, la producción relativa de granos estimada será el 95% del 68%, o sea $0.95 \times 0.68 = 0.65$. Esto significa que si el cultivo regado en condiciones óptimas produce $(C_x)_v = 7500$ Kgr/ha de masa vegetativa, y $(C_x)_g = 6000$ Kgr/ha de grano (Biomasa total = $7500 + 6000 = 13500$ Kg/ha) en las condiciones del ejemplo 2, la producción estimada sería $C_v = 0.95 \times 7500 = 7125$ Kg/ha de masa vegetativa, y $C_g = 0.95 \times 0.68 \times 6000 = 3875$ Kg/ha de granos (Biomasa total = $7125 + 3876 = 11000$).

TABLA 9. Valores típicos del coeficiente c , para la estimación del crecimiento vegetal en función de la evapotranspiración (Norero, 1974, c)

<u>Clase de Cultivo</u>	<u>c</u>
1. Perennes, de follaje vertical (ej. caña de azúcar)	0.2
2. Perennes, de follaje horizontal (ej. alfalfa)	0.1
3. Anuales, de ciclo corto (2 - 3 meses)	
a) follaje vertical (ej. ajo)	0.8
b) follaje inclinado (ej. caraota)	0.6
c) follaje horizontal (ej. tomate)	0.4
4. Anuales, de ciclo intermedio (3-4 meses)	
a) follaje vertical (ej. cebolla)	0.5
b) follaje inclinado (ej. maíz)	0.3
c) follaje horizontal (ej. algodón)	0.3
5. Anuales, de ciclo largo (4 - 5 meses)	
a) follaje vertical (ej. arroz)	0.3
b) follaje inclinado (ej. papa)	0.2
c) follaje horizontal (ej. algodón)	0.2

3.2.4. Comentarios.

El número total de riegos en turnos fijos de 15 días, sería de 7 en vez de 11. (Figuras 26 y 25). El gasto total (mínimo, por no considerar ineficiencias de aplicación) sería de 4690 m³/ha en vez de 5570 m³/ha, es decir un 16% de agua. Esta reducción significa mermar en un 6% la evapotranspiración del cultivo durante el desarrollo vegetativo, y entre un 32% y

19% en la formación del grano. En estas condiciones, la producción se reduce en forma importante, particularmente la cosecha de granos, porque el déficit hídrico es más severo durante su formación. El ejemplo ilustra un caso en que una moderada reducción en el suministro de agua, 16%, produce una considerable reducción en la cosecha, 35%; (100% - 65%). Esto se debe a que la demanda de agua es elevada, especialmente durante el granado. En condiciones menos exigentes de evaporación, la reducción del suministro de agua influiría menos en la producción.

3.3 BALANCE HIDRICO.

El balance hídrico es la formulación matemática de la ley de conservación de materia, aplicada al agua en un sistema dado. El sistema puede ser de cualquier tamaño, por ej.: el volumen de suelo ocupado por una planta; una parcela cultivada; una cuenca hidrológica, una región, un país, etc. Se le ha empleado para planificar el aprovechamiento de los recursos hidráulicos (Buroz y González, 1971; Makkink y van Heemst, 1975); identificar períodos de déficit y suficiencia de agua a los cultivos (Williams y Joseph, 1974); como índice climático (Sellers, 1965); para el manejo del riego a nivel de parcela (Rondon, 1974); para analizar las fluctuaciones de humedad del suelo (Comerma y Blavia, 1972) y para la zonificación de cultivos en agricultura de lluvia (Norero y Rincón, 1976 d).

El balance hídrico especifica que el total de agua que penetra a un sistema debe ser igual al agua que sale de él, más la diferencia entre los contenidos final e inicial; es decir, ingreso = egreso + saldo. En el caso de un suelo con vegetación, el balance es:

$$P = ET + S + L_f - L_i$$

P, es la precipitación total (lluvia, rocío, riego, etc.); ET es la evapotranspiración; S es el escurrimiento de agua, e incluye

la diferencia de ingresos y egresos superficiales (escorrentía hacia o desde el suelo) y subterráneos (filtraciones, drenaje, ascenso freático, percolación); L_f , es el agua remanente en el suelo al término del período, y L_i el agua del suelo al iniciar se el período. Todos los términos están expresados como lámina, por ej., en cms.

3.3.1. Datos necesarios.

Los mismos de los ejemplos anteriores. Si se trata de vegetación ya establecida y/o perenne no se necesitan t_c ni a , y varía el cálculo de ET_x en función de E_v . En este caso: $ET_x = f E_v$, donde el coeficiente $f=0.4$ para vegetación baja, poco frondosa y con mucho suelo expuesto; $f=0.8$ para situaciones frondosas, mediana estatura y poco suelo expuesto (como la mayoría de los cultivos al alcanzar el auge vegetativo), y $f=1.2$ en condiciones de excepcional estatura, frondosidad y densidad foliar (p. ej. caña de azúcar, pasto elefante en el apogeo de su desarrollo).

3.3.2. Ejemplo 3.

Calcular el balance hídrico típico mensual en un suelo de sabana en los Altos Llanos Occidentales de Venezuela, con las siguientes características: suelo arcillo-limoso ($S = 0.3$, Figura 24); capacidad de campo, 0.4033 cm/cm; punto de marchitez definitiva, 0.1933 cm/cm; humedad aprovechable, 0.2100 cm/cm; grama establecida, alta frondosidad ($f = 0.9$) y enraizada hasta $R_x = 60$ cms. Por lo tanto, la lámina a capacidad de campo, $L_c = 0.4033 \times 60 = 24.2$ cms; al marchitamiento final, $L_m = 0.1933 \times 60 = 11,6$ cms, y la lámina total aprovechable, $L_A = 12.6$ cms. La demanda atmosférica (evaporación de tina estandar, E_v) y la precipitación, totales mensuales, son los indicados en la Tabla 9.

3.3.3. Procedimiento.

La información mensual variable y los cálculos se orde -

nan en la forma que muestra la Tabla 10:

1°) Calcule la evaporatividad efectiva (evapotranspiración máxima): $ET_x = f E_v$, cms. (columna 4).

2°) escoja un valor arbitrario, L_0 , para iniciar el balance. Por ejemplo, suponga que en el mes más húmedo, el suelo está a la capacidad de campo, o sea $L_0 = L_c$. El mes más húmedo es presumiblemente aquel en que $P - E$ muestra el máximo valor. En el ejemplo, ocurre en Julio y por eso se inician los cálculos en este mes. Por lo tanto, la columna 5 está encabezada por $L_i = L_0 = L_c = 24.2$ cms.

3°) Calcule el coeficiente de marchitamiento incipiente, U (columna 6), como en los ejemplos anteriores; advierta sin embargo que se entra el valor promedio de evapotranspiración máxima ET_x/N , puesto que ET_x está dado en este ejemplo como valor mensual:

$$U = \sqrt[3]{r \cdot s \left(1 - \frac{ET_x}{N} \right)}$$

4°) Estime la lámina a la cual se produce el marchitamiento incipiente, L_x (columna 7)

$$L_x = L_c - U L_A \quad \text{cms.}$$

5°) Anote en la columna 8 el coeficiente de escurrimiento neto de agua, e (Sellers, 1965)

$$e = \frac{0.4 P^2}{(ET_x + P) L_c}$$

6°) En forma provisoria, calcule la probable lámina remanente en el suelo a fin de mes, si el cultivo hubiera transpirado a la tasa máxima, L_{fx} (columna 9) (Sellers, 1965):

$$L_{fx} = \frac{P - ET_x + (1-e) L_i}{1 + e} \quad \text{cms.}$$

los valores necesarios están en las columnas 3, 4, 8 y 5.

7°) Compruebe si efectivamente la vegetación podía evaporar al máximo.

TABLA 10. Cálculo del balance hídrico mensual para las condiciones del Ejemplo 3.

MES	1 N días	2 P cms	3 E _v cms	4 ET _x cms	5 L _i cms	6 U	7 L _x cms	8 e	9 L _{fx} cms	10 L̄ cms	11 a	12 L _f cms	13 S cms	14 ET cms	15 ET/ ET _x
JUL	31	26.3	14.4	13.0	24.2	0.52	17.7	0.29	23.6	23.9			13.9	13.0	1.00
AGO	31	21.7	15.6	14.0	23.6	0.51	17.8	0.22	21.5	22.5			9.8	14.0	1.00
SEP	30	19.3	15.3	13.8	21.5	0.51	17.8	0.19	19.4	20.4			7.6	13.8	1.00
OCT	31	14.4	16.6	14.9	19.4	0.50	17.9	0.12		17.5		15.7	4.1	14.0	0.94
NOV	30	9.3	16.0	14.4	15.7	0.50	17.9	0.06		15.2		14.8	1.8	8.3	0.58
DIC	31	2.8	17.9	16.1	14.8	0.49	18.1	0.007		13.6		12.4	0.2	5.0	0.31
ENE	31	1.7	22.4	20.2	12.4	0.44	18.7	0.002		12.2		12.1	0.1	1.9	0.10
FEB	28	0.4	24.2	21.8	12.1	0.38	19.5	0.000		11.9		11.7	0.0	0.9	0.04
MAR	31	1.6	25.9	23.3	11.7	0.39	19.3	0.002		11.9		12.2	0.0	1.0	0.04
ABR	30	9.6	21.7	19.5	12.2	0.44	18.7	0.05		13.6		14.5	1.4	5.4	0.28
MAY	31	23.3	17.6	15.8	14.5	0.49	18.0	0.23		16.6		18.3	7.6	12.3	0.78
JUN	30	25.9	14.3	12.9	18.3	0.52	17.7	0.29	20.3	19.3			11.0	12.9	1.00
JUL	31	26.3	14.4	13.0	20.3	0.52	17.7	0.29	21.4	20.9			12.1	13.0	1.00
2a. iteración															
AGO					21.4				20.1	20.8			9.1	14.0	1.00
SEP					20.1				18.4	19.3			7.2	13.8	1.00
OCT					18.4					17.1		15.8	4.0	13.0	0.87
NOV					15.8					15.3		14.8	1.8	8.5	0.59
DIC					14.8					13.6		12.4	0.2	5.0	0.31
ENE					12.4					12.3		12.1	0.1	1.9	0.10
FEB					12.1					11.9			0.0	0.9	0.04
Totales anuales		156.3		199.7									54.5	101.7	
Promedios				0.55 cm/ día		0.47	18.3			16.1				0.28 cm/ día	0.51

Para ello, la humedad promedio del suelo durante el mes, \bar{L} , debe ser igual o superior a la lámina asociada al marchitamiento incipiente, L_x : Considere el valor promedio como la semisuma de las humedades final e inicial (columna 10):

$$\bar{L} = 0.5 (L_i + L_f) \quad \text{cms.}$$

8°) Compare las columnas 7 y 10:

(a) Si $\bar{L} \geq L_x$, la evapotranspiración es igual a la máxima, $ET = ET_x$. El valor de ET_x , columna 4, se ingresa en la columna 14.

(b) Verifique además si $\bar{L} \leq 0.5 (L_i + L_c)$, puesto que la humedad final, L_f , no puede exceder la capacidad de retención del suelo. Si \bar{L} resulta mayor, haga $L_f = L_c$.

Comprobadas estas relaciones, L_{fx} es efectivamente la humedad final del mes en cuestión. Su valor pasa a ser el valor inicial, L_i , del mes siguiente; por ej., $L_{fJulio} = L_{iAgosto}$ (comparar columnas 5 con 9 ó 12). Omite los cálculos 9°) y 10°) siguientes y complete las columnas 13 y 14 según instrucciones en 11°) y 12°)

(c) Si $\bar{L} < L_x$, la evapotranspiración no pudo transcurrir a su máxima intensidad, y se vio disminuida por el marchitamiento progresivo. En este caso, calcule el coeficiente de aprovechamiento de agua, a , según:

$$a = \frac{ET_x}{2 L_A (1-U)}$$

los datos necesarios están en las columnas 4 y 6; (en el ejemplo, $L_A = 12.6$ cms) (Columna 11).

9°) Calcule la humedad final del mes bajo uso restringido del agua, L_f : (Sellers, 1965)

$$L_f = \frac{P + (1-e) L_i + a(2 L_m - L_i)}{1 + e + a} \quad \text{cms.}$$

Entre el resultado en columna 12.

10°) Calcule la humedad promedio del mes por la relación ya indicada en 7°), pero usando el nuevo y definitivo valor de L_F (columna 12).

11°) Estime el escurrimiento neto de agua, S

$$S = e (L_i + L_F) \quad \text{cms.}$$

con los datos de las columnas 8, 5, y 9 ó 12, según proceda. (columna 13).

12°) El valor de ET mensual es igual a ET_X si se cumplieron las condiciones de 7°). De lo contrario:

$$ET = \left(\frac{\bar{L} - L_m}{L_X - L_m} \right) ET_X \quad \text{cms.}$$

13°) El valor de la humedad final del mes se hace igual a la humedad inicial del mes siguiente. Se procede así hasta completar los 12 meses. A menudo ocurre que la humedad inicial arbitraria, L_0 , del comienzo de los cálculos no coincide con la que se deduce al completarse los primeros doce cálculos mensuales. Se repite entonces todo el procedimiento empleando como valor de partida, L_0 , el deducido del cálculo. Continuando en esta forma iterativa, se consigue "cerrar" el balance. En el ejemplo de la Tabla 10 esto ocurre al repetir los cálculos del mes de Febrero. Por lo tanto, el balance hídrico típico o promedio es el indicado por las doce últimas hileras de cálculos, de Marzo a Febrero. Durante la iteración no hace falta volver a calcular U , L_X , e y a porque permanecen invariables.

3.3.4 Comentarios.

La precipitación total anual de la región es 156 cms (Tabla 10); la demanda efectiva de evaporación (ET_X), es 199 cms. La vegetación consigue evaporar sólo 101 cms., es decir sólo el 51% de esa demanda. Respecto a la precipitación, la vegetación consume el 65% a escala anual. De los 12 meses del año, solamente en cuatro se alcanza la tasa máxima de evaporación. Se trata evidentemente, de una situación en general árida. No obstante, las pérdidas por escurrimiento superficial y

percolación son considerables: de los 156 cms. de lluvia, se pierden 54 por esta causa, lo que equivale al 35% de la precipitación. En los meses más secos (Noviembre a Abril), el escurrimiento neto es bajo, 2 cms, o el 10% de la precipitación; en los meses más húmedos (Mayo a Octubre), las pérdidas son de 52 cms, o el 40% de las lluvias de esa época. La conservación del agua excedente, para su utilización en la época seca, debe comenzar por lo tanto en la estación lluviosa.

En ninguna época del año, es la humedad promedio del suelo igual a la capacidad de campo, lo que insinúa que el suelo no tiende a saturarse si posee drenaje interno y escorrentía superficial. Por el contrario si existen impedimentos al movimiento del agua excedente, S se sumará a la humedad promedio del suelo, \bar{L} ; si la suma resulta superior a la capacidad de campo, L_c , quedan insinuadas las épocas de propensión a la inundación. De la Tabla 10 se deduce que ésto ocurre de Junio a Septiembre.

La humedad promedio anual del suelo, \bar{L} , es 16.1 cms., valor que está por debajo del valor promedio de 18.3 cms. de la lámina del marchitamiento incipiente, L_x , lo cual acontece cuando se ha consumido el 47% (U) de la lámina aprovechable. Esta insuficiencia de agua es la que permite a la vegetación evapotranspirar sólo al 51% de la tasa máxima. En estas condiciones, si se aplica la relación entre producción y evapotranspiración relativa del Ejemplo 2, y se adoptan los valores $c=0.15$ (Tabla 9) y $b=0.25+0.55=0.80$, se tiene que la productividad promedio anual es $\frac{C}{C_x} = [(1-0.15)(0.51)-0.15]^{0.8} = 0.37$. El valor 0.36 expresa que el crecimiento vegetal (biomasa) en las condiciones del Ejemplo 3, es en promedio el 36% de lo que podría obtenerse si existiera suficiente agua. Puede considerarse como un índice anual de la productividad en secano. También pueden calcularse índices mensuales de productividad usando los correspondientes valores de ET/ET_x y ET_x mensuales, este último para cal

cular el coeficiente b mensual. Este cálculo muestra que para el Ejemplo 3 se produce crecimiento vegetal sólo en Abril y Diciembre. La figura muestra la evolución anual de este parámetro en consonancia con la evapotranspiración relativa, y los componentes del balance hídrico de la Tabla 10.

El procedimiento propuesto es aplicable cuando no existe contribución de agua subterránea por ascenso freático. De lo contrario, debe incorporarse este ingreso al balance hídrico (Norero, 1974 b).

4. LITERATURA CITADA.

- A.S.A.E. 1966. Methods of estimating evapotranspiration. American Soc. of Agric. Eng. Irrigation and Drainage Specialty Conference. Las Vegas, Nov. 1966.
- Buroz, . y S. González. 1971. Contribución al estudio del clima en la región de los Llanos Centrales y Occidentales y su relación con la producción agrícola. IV Jornadas Venezolanas de Riego. Caracas.
- Comerm , J.A. y F. Blavia. 1972. Patrón de distribución de humedad en suelos del Yaracuy medio durante un año. IV Congr. Lat. y II Congr. Nac. Venez. de la Ciencia del Suelo. Maracay.
- Hall, W.A. y J.A. Dracup. 1970. Water Resources Systems Engineering. McGraw Hill Book, Co. Nueva York.
- Grassi, C.J. 1968. Variación de la Evapotranspiración relativa durante el ciclo vegetativo de los cultivos. Memorias, II Jornadas Venezolanas de Riego. Caracas, Octubre 1968.
- Grassi, C. J. 1976 a. Métodos de riego. CIDIAT. Mérida, Venezuela.
- Grassi, C.J. 1976 b. Operación y Conservación de Sistemas de Riego. CIDIAT. Mérida, Venezuela.
- Gutiérrez, O. 1975. Introducción a la evaporación y evapotranspiración. CIDIAT. Mérida, Venezuela.
- Makkink, G.F. y H.D.J. van Heemst. 1975. Simulation of the water balance of arable land and pastures. Simulation Monographs. PUDOC. Wageningen, Holanda.
- Monteith, J.L. 1975. Vegetation and the Atmosphere. Academic Press. Londres.
- Norero, A. 1974.a. Concepto dinámico de humedad disponible y su estimación para fines técnicos. V Jornadas Venezolanas de Riego. Caracas. Noviembre de 1974. CIDIAT. Mérida, Venezuela.
- Norero, A. 1974 b. Procedimiento para estimar la influencia de la napa freática en la productividad de los cultivos. V Jornadas Venezolanas de Riego. Caracas, Nov. 1974. CIDIAT, Mérida, Venezuela.

- Norero, A. 1974 c. Fórmula para estimar la influencia de la humedad del suelo en la productividad de los cultivos. V Jornadas Venezolanas de Riego. Caracas, Noviembre 1974. CIDIAT, Mérida Venezuela.
- Norero, A. 1976 a. La evapotranspiración de los cultivos. Aspectos agrofísicos. CIDIAT. Mérida, Venezuela.
- Norero, A. 1976 b. Variables agrofísicas del riego. Curso Breve sobre Operación y Conservación de Sistemas de Riego. CIDIAT. Mérida, Venezuela.
- Norero, A. 1976 c. Estudios inéditos. CIDIAT. Mérida, Venezuela.
- Norero, A. y B. Ricón. 1976 d. Planificación de siembras anuales en suelos de secano. IV Congr. Nac. de la Soc. Ven. de Ciencia del Suelo. Maturín. CIDIAT. Mérida, Venezuela.
- Reeve R.C. y M. Fireman. 1967. Salt problems in relation to irrigation. En, Irrigation of agricultural lands (Hagan, R.M.; H.R. Halse, y T.W. Edminster, eds.) Agronomy 11. Amer. Soc. of Agron., Pub. Madison, Wisconsin.
- Rondon, F.F. 1974. Cálculo del balance hidrológico para una zona bajo riego. V Jornadas Venezolanas de Riego. Caracas.
- Rosemberg, Norman J. 1974. Microclimate: the biological environment. John Wiley & Sons, Nueva York.
- Salazar, J.V. 1971. Preguntas y respuestas sobre tensiómetros y su uso. I Curso de entrenamiento para ingenieros en riego y desarrollo (Traducido de A. Marsh; Publi. AXT-92; Calif. Agric. Exp. Sta.) M.O.P., Caracas, Venezuela.
- Salter, P.J. y J.E. Goode. 1967. Crop response to water at different stages of growth. Research Review 2. Comm. Agric. Bureaux. Bucks, Inglaterra.
- Seller, N.D. 1965. Physical climatology. The University of Chicago Press. Chicago.
- Taylor, S.A. y G.L. Ashcroft. 1972. Physical Edaphology; the physics of irrigated and non irrigated soils W.H. Freeman & Co. San Francisco.
- Williams, C.N. 1974. Climate, soil and crop production in the humid tropics (rev. ed.). Kuala Lumpur, Oxford University Press. Londres.

**Este libro se terminó de imprimir
en Mayo de 1981 en el Taller de
Reproducción del CIDIAT. Se re-
produjeron 200 ejemplares.**

Este libro se terminó de imprimir
en el mes de mayo de 1951 en el taller de
impresión de la Universidad Central de Venezuela.
Distribución en 100 ejemplares.





