TP Nº 1

Hidrología agrícola. Análisis de los componentes del ciclo hidrológico. Aplicación de metodologías para la medición y estimación de la precipitación efectiva y la evapotranspiración.

Equipo docente:

Ing. Agr. Leopoldo J. Génova (Dr. M. Sc.), Profesor Titular Ordinario

Ing. Agr. Ricardo Andreau, Profesor Adjunto Ordinario

Ing. Agr. Marta Etcheverry, Jefe de Trabajos Prácticos Ordinario

Ing. Agr. Pablo Etchevers, Jefe de Trabajos Prácticos

Ing. Agr. Walter Chale, Ayudante Diplomado

Ing. Agr. Luciano Calvo Ayudante Diplomado

Ing. Agr. Facundo Ramos, Ayudante Diplomado

Ing. Agr. Cecilia Pascual, Ayudante Alumna

Ciclo hidrológico

El recurso agua es el más básico y elemental de todos los recursos que el hombre dispone. Este recurso, que es de los típicamente considerados renovables, es alterado en su calidad y distribución espacial y temporal por el uso indiscriminado que el hombre hace del mismo. Además, el agua no es un recurso aislado, sino que se encuentra en un delicado equilibrio con otros recursos: suelo, vegetación y atmósfera, lo que determina que cualquier modificación de uno de ellos, repercutirá en los demás. Este conjunto de recursos constituye el medio ambiente que hace posible la vida humana, por lo que su conservación es una necesidad vital.

Por esto, el uso del recurso agua deberá ser racionalmente planificado, lo cual implica el cumplimiento de los siguientes pasos:

1. Análisis e interpretación del funcionamiento del **ciclo hidrológico.** Para ello se aplican técnicas y metodologías de análisis sobre la base de los datos suministrados por los sistemas de información hídrica (precipitación, escorrentía, caudales, parámetros de los acuíferos, etc.)
2. Evaluación de los recursos hídricos: es conveniente realizarla a diferentes escalas.
3. Selección de alternativas: a los efectos de planificar el uso del recurso.
4. Elaboración de proyectos de aprovechamiento hídrico.

A los fines prácticos el área física donde se estudia el ciclo hidrológico es la cuenca. Se entiende por **cuenca hidrográfica** de un curso de agua (en un determinado punto de dicho curso) al área delimitada topográficamente en la cual la lluvia caída es conducida, por escurrimiento superficial, por escurrimiento subterráneo o a través de afluentes, al punto del curso considerado.

Esquemas del tipo diagrama de bloque aplicados al ciclo hidrológico

Se trata de representar las relaciones funcionales más importantes, partiendo de las siguientes hipótesis:

- Se dispone de un medio físico representado por una cuenca con sus características de vegetación, suelo y subsuelo.
- Sobre ese mismo sistema físico actúan los fenómenos atmosféricos representados por el aporte de las precipitaciones y por la demanda de vapor de agua de la atmósfera.

- El sistema físico reacciona ante la acción de los fenómenos atmosféricos produciendo cambios internos, representados por distintas formas de **almacenamiento** y **transporte** de agua, dando como resultado salidas del sistema representadas por el **escurrimiento** y pérdidas hacia la atmósfera en forma de **vapor de agua.**
- Sobre la cuenca pueden actuar aportes de agua provenientes de otras cuencas y puede, a su vez, haber pérdidas hacia otras cuencas. En este último caso se trata de un sistema hidrológicamente no aislado, lo cual constituye la situación más frecuente.
- Los efectos de almacenamiento y transporte que se producen en el sistema físico, se representan por un desarrollo vertical de diferentes niveles de almacenamiento con la comunicación entre los mismos. Si bien su validez es puntual, las consideraciones que se plantean pueden extenderse aéreamente.

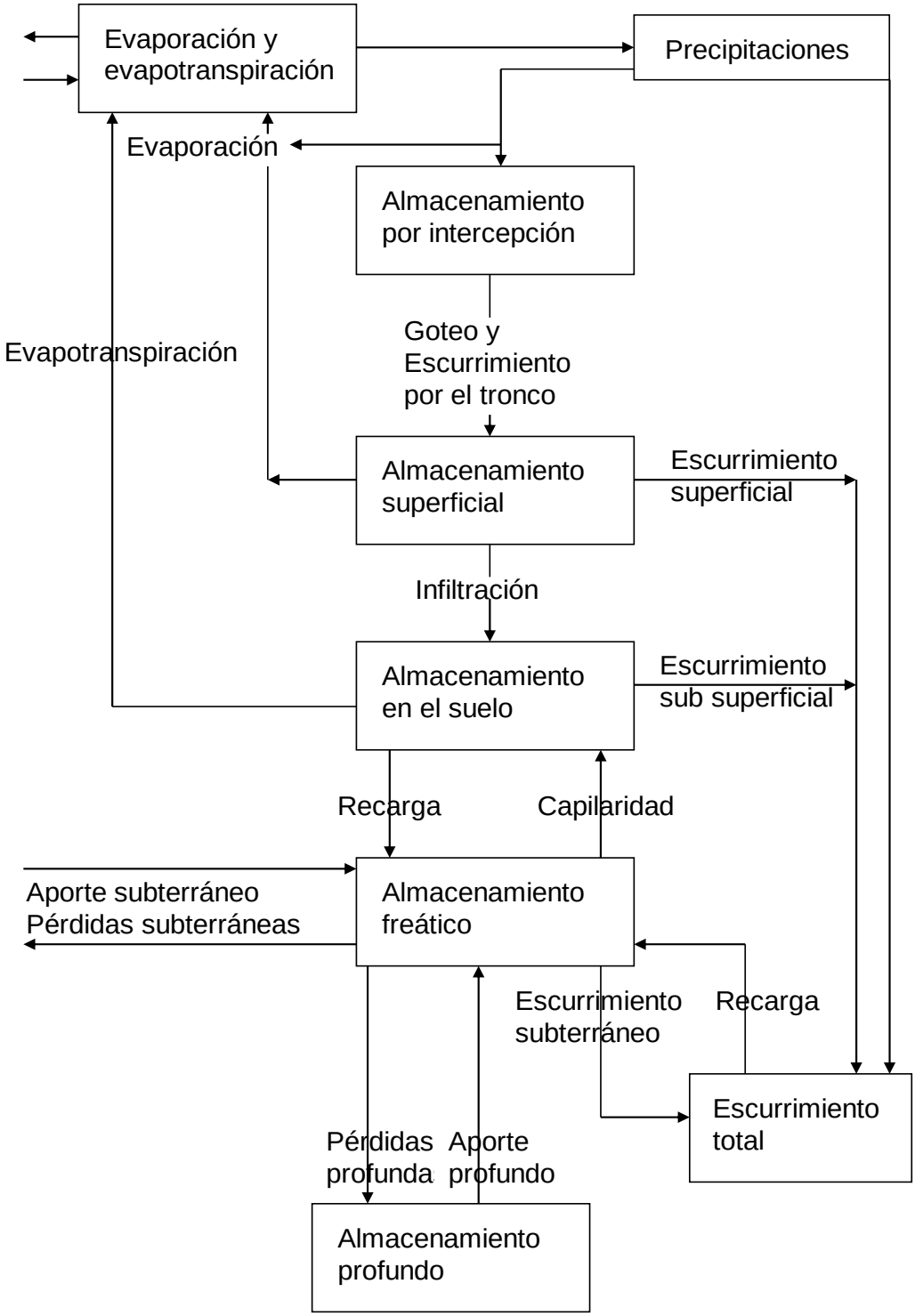
Según esas consideraciones se describen los fenómenos que actúan en el ciclo y que figuran en el **Esquema Nª 1.**

El fenómeno de precipitación es la variable de entrada principal al sistema físico. Se entiende por tal al agua caída en sus diferentes formas: lluvia, nieve, etc. La energía térmica y la gravitación son las fuerzas motrices del ciclo. De la cantidad total de agua que precipita, una parte se evapora directamente en la atmósfera. Esta proporción puede ser importante en condiciones de elevada demanda atmosférica.

Si existe cobertura vegetal, esta constituye el **primer nivel de almacenamiento** que se denomina **intercepción**. Está constituida por la cantidad de agua que la vegetación puede tener inicialmente. Se caracteriza por ser un almacenamiento de funcionamiento transitorio, durante el tiempo de precipitación y hasta un breve tiempo posterior a la misma.

Parte del agua que inicialmente es retenida por la vegetación, escurre por las ramas y el tronco o gotea desde las hojas llegando finalmente al suelo. La diferencia entre el volumen de agua retenido y el que, por escurrimiento y goteo, llega al suelo se denomina **intercepción efectiva**. Corresponde a la cantidad de agua que evapora directamente desde la cubierta vegetal. El agua llega al suelo desde la cubierta vegetal o directamente de la precipitación.

Esquema Nª 1


Evaporación y evapotranspiración
Precipitaciones
Evaporación
Almacenamiento por intercepción
Evapotranspiración
Goteo y Escurrimiento por el tronco
Almacenamiento superficial
Escurrimiento superficial
Infiltración
Almacenamiento en el suelo
Escurrimiento sub superficial
Recarga
Capilaridad
Aporte subterráneo
Pérdidas subterráneas
Almacenamiento freático
Escurrimiento subterráneo
Recarga
Escurrimiento total
Pérdidas profunda
Aporte profundo
Almacenamiento profundo

En la superficie del suelo se encuentra el **segundo nivel de almacenamiento**, que es el **almacenamiento superficial**. Comprende el agua que se acumula sobre el terreno hasta conseguir un tirante hidráulico suficiente para vencer los efectos de rugosidad y poder escurrir en forma de lámina (componente transitoria). También comprende aquellos volúmenes que quedan retenidos en las cavidades y hondonadas del terreno sin poder escurrir (componente medianamente permanente). La lámina que escurre se denomina **escurrimiento superficial.** Desde el almacenamiento por intercepción y desde el almacenamiento superficial, se produce evaporación.

La superficie del terreno se comporta como un tamiz de malla variable, según el tipo y manejo del mismo y de su cubierta vegetal. Por lo tanto, la velocidad con que ingresa el agua al interior del suelo, dependerá de ese "tamiz". Se denomina **infiltración** a la velocidad con que ingresa el agua en el interior del suelo. El almacenamiento superficial se forma cuando la intensidad de la precipitación supera la velocidad de infiltración.

El agua infiltrada alimenta el **tercer nivel de almacenamiento**: el **almacenamiento del suelo**, que es altamente complejo pero de fundamental importancia para el riego**.** Desde este nivel de almacenamiento se producen pérdidas por evaporación desde la superficie del suelo y pérdidas por transpiración a través de los estomas de las plantas, constituyendo la **evapotranspiración.**

Durante una lluvia, el agua que ingresa a poca profundidad puede encontrarse con capas de suelo de menor permeabilidad y dar lugar a la formación de una lámina de detención, que a su vez da lugar al denominado **escurrimiento subsuperficial**. Se produce en general en forma paralela a la superficie del terreno y se caracteriza por tener una velocidad de avance menor a la del escurrimiento superficial. El escurrimiento subsuperficial, junto con el escurrimiento superficial, constituyen el **escurrimiento directo.**

El agua que ha ingresado al perfil del suelo va humedeciéndolo y desplazándose hacia abajo, fenómeno que se denomina avance del frente de humedad. Cuando el frente de humedad se encuentra con una capa de permeabilidad muy reducida puede desarrollar una zona saturada que constituye un **cuarto nivel de almacenamiento**: **almacenamiento freático**. El pasaje del agua desde el almacenamiento en el suelo al almacenamiento freático, se denomina **percolación**.

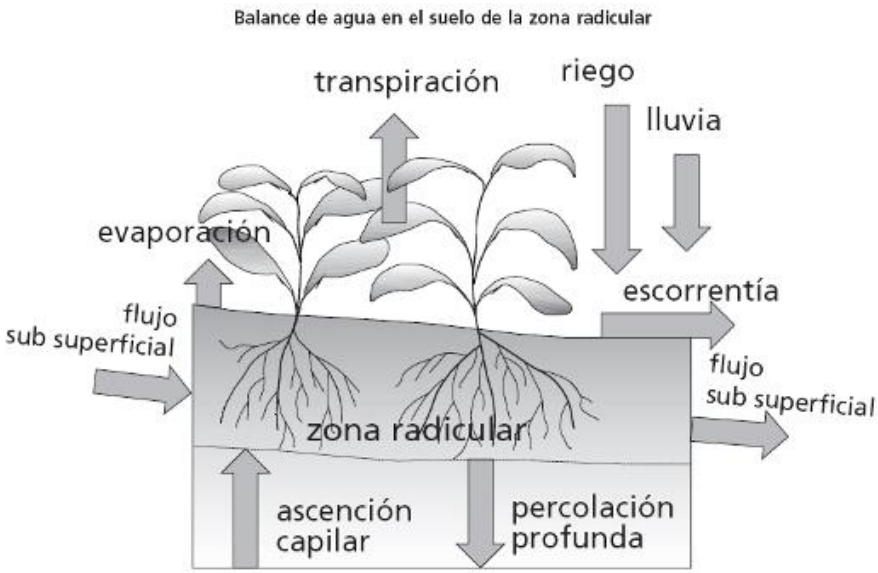
El agua del almacenamiento freático puede ascender al almacenamiento del suelo por **capilaridad.** Estas relaciones en períodos de humedecimiento y desecamiento, que

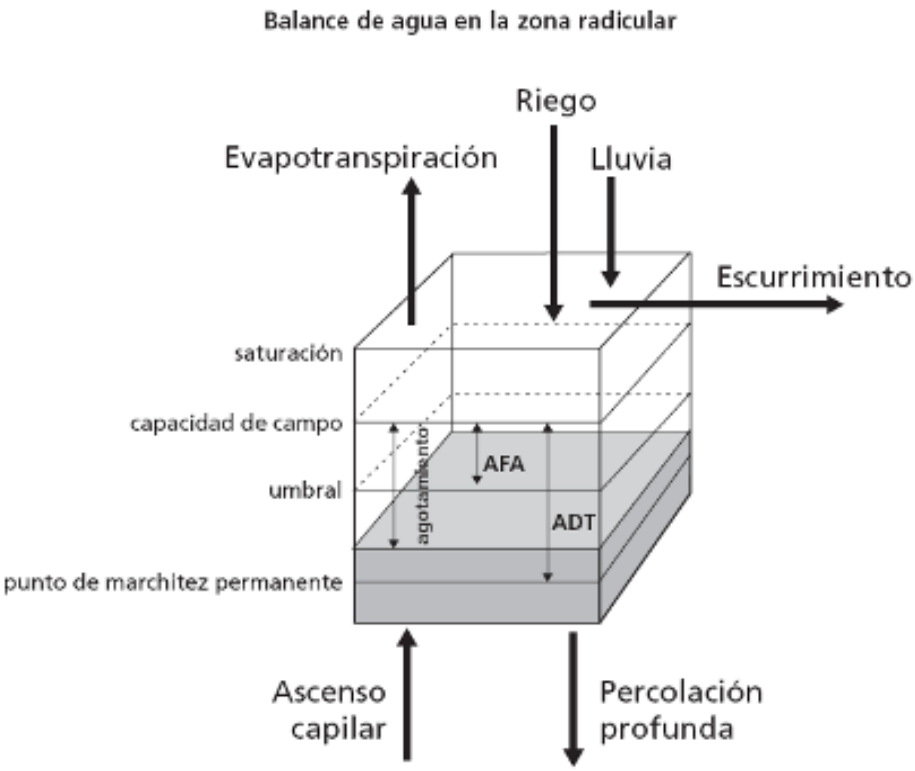
vinculan el nivel de almacenamiento de agua en el suelo con el nivel de almacenamiento freático, están fuertemente condicionadas por la profundidad a la cual se encuentra este último. Un nivel freático cercano a la superficie y otro muy profundo caracterizan sistemas de funcionamiento totalmente distintos.

El agua que se acumula en el almacenamiento freático tiene un movimiento regido por las leyes del escurrimiento en medios porosos saturados. En una cuenca hidrológicamente aislada, cuando el nivel freático intercepta a los cauces que conforman la red de escurrimiento, descarga en ellos proporcionando lo que se denomina **escurrimiento de base** o **subterráneo**, que sumándose al escurrimiento directo, dan por resultado el **escurrimiento total** que transporta ese cauce.

Estos escurrimientos tienen diferentes velocidades y diferentes tiempos de aportes a un cauce. Generalmente el escurrimiento directo proporciona los caudales de agua más importantes que conforman una crecida debida a una lluvia, mientras que el escurrimiento de base proporciona los caudales que escurren en períodos no lluviosos. El derrame total de un curso en un momento determinado puede estar constituido por aporte directo, aporte de base o por ambos a la vez.

En una cuenca hidrológicamente no aislada, puede haber aportes o pérdidas subterráneas, esporádicas o permanentes. Estos mecanismos de transporte se pueden dar con otras cuencas o en profundidad. En este último caso, se está en presencia de niveles de almacenamiento profundo en general de características más o menos confinadas.





Balances hidrológicos

En el ciclo hidrológico, existe un equilibrio entre las entradas, las salidas y las variantes del sistema considerado. Las relaciones cuantitativas que se establecen para representar a este equilibrio son los **balances hidrológicos**.

Para establecer un balance hidrológico hay que considerar el sistema o la parte del mismo donde se realiza el balance y el intervalo de tiempo que se considera.

En el caso especial de riego, es necesario hacer un balance donde se considere no sólo las condiciones reales de evapotranspiración, sino la óptima para un cultivo dado. En ese caso deberá regarse en aquellos períodos en que la precipitación efectiva no alcance a cubrir la evapotranspiración del cultivo.

Métodos de balance hídrico del suelo: se aplica a diferentes escalas de tiempo y espacio, para estudios a nivel climático o nivel agronómico para programas de riego, que son el objeto de nuestro estudio.

Los balances hídricos del suelo serán equilibrados y precisos en función de la rigurosidad y exactitud en que puedan medirse las variables cuya suma algebraica permiten obtener la Et, de acuerdo a:

$$Et = P + Ac - D \pm Hs \pm Es$$

Donde:

Et = evapotranspiración durante un periodo de tiempo

P = precipitaciones acumuladas en un periodo de tiempo

Ac = aporte capilar de agua en el periodo de tiempo

Es = entradas y salidas de agua laterales por escorrentía superficial

D = drenaje o flujo vertical de agua en profundidad, fuera de la rizósfera.

Hs = contenido hídrico del suelo

Las mediciones de las variables Hs, Ac y D, requieren instrumental para caracterizar potenciales de agua del suelo.

Precipitación

El cómputo de la variable precipitación es el insumo fundamental para la formulación del balance hidrológico y una de las variables más importantes para la resolución de problemas hidrológicos. La medición de la precipitación se realiza en su estado líquido o lluvia (por medio de pluviómetros o de pluviógrafos). Para el caso de precipitación nival se utilizan nivómetros o totalizadores. Todos los cálculos en los cuales participa la variable, suelen realizarse considerando los volúmenes precipitados o más frecuentemente la altura media de una lámina hipotética de agua precipitada.

En el primer caso, participa el área en cuestión como factor de cómputo; en el segundo, se considera que toda la lluvia caída en la cuenca, se acumula en una figura de la misma área que la cuenca pero de fondo horizontal, no existiendo pérdidas por evaporación, infiltración o escurrimiento.

Se emplean básicamente tres métodos para calcular dicha altura, los cuales se desarrollan a continuación mediante un ejemplo gráfico analítico en el cual se muestra una cuenca tipo y una serie de pluviómetros. Los métodos son: **Media aritmética,**

métodos de las isohietas y método de Thiessen. Los datos de la cuenca son los siguientes:

Estación	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
Prec. (mm)	886	891	875	809	804	787	713	763	664	624	556	503	443	420	361	303

Media aritmética

Se trata simplemente de hallar la media de los valores de precipitación (en mm) entre aquellas estaciones pluviométricas incluidas en la cuenca.

$$\text{Precipitación media} = \frac{\sum \text{Precipitaciones}}{\text{Número de estaciones}}$$

Es el método más simple, pero solamente debe ser utilizado en condiciones de clima homogéneo y topografía llana, sin accidentes orográficos que introduzcan diferencias marcadas en la distribución areal de los valores.

$$\text{Precipitación media} = \frac{\sum \text{Precipitaciones}}{\text{Número de estaciones}} = \frac{10.402\text{mm}}{16} = 650 \text{ mm}$$

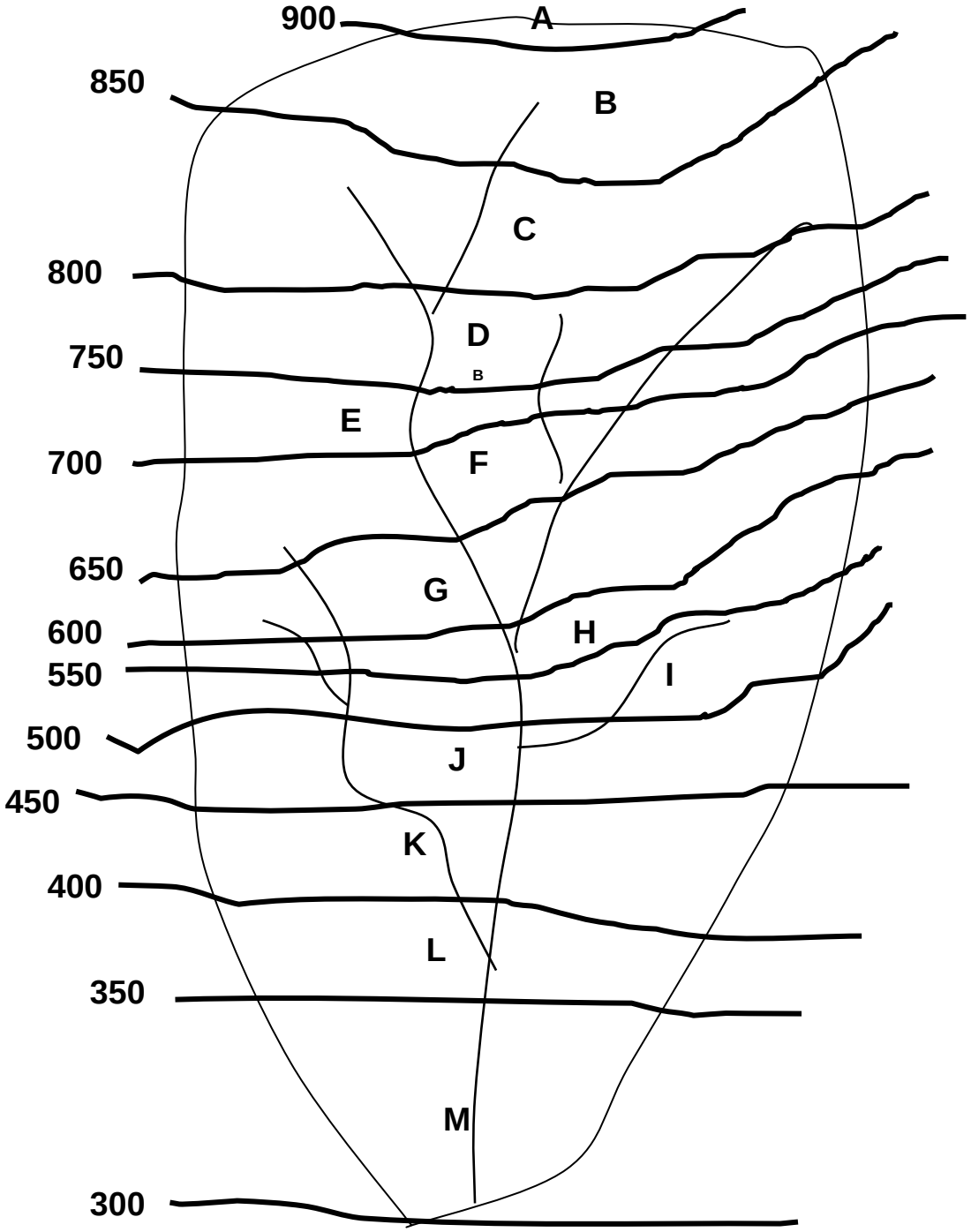
Método de las isohietas

La distribución areal de las precipitaciones se realiza en el marco de las curvas isohietas o isoyetas (curvas que unen puntos de igual precipitación pluvial). Las curvas se trazan interpolando los valores entre las estaciones, atendiendo al trazado de las curvas topográficas base para lograr una geometría acorde a los desniveles del terreno que recibe la lluvia. Multiplicando el área incluida entre dos isohietas consecutivas, por la semisuma del valor de ambas, se logran volúmenes parciales, dividida por el área total, da el valor de la altura media buscada. La determinación del área se realiza por planimetría, cerrándose con los bordes de la cuenca. Este método es especialmente apto para zonas con topografía abrupta, que influye en el régimen de lluvia.

Superficie de la cuenca: 33.445 ha.

Area	Superficie (ha)	Precipitación (mm)	Volumen (Hm^3)
A”	87	925	0,8
B”	4.197	875	36,72
C”	4.134	825	34,11
D”	3.582	775	27,77
E”	2.906	725	21,07
F”	2.217	675	14,96
G”	2.863	625	17,89
H”	2.763	575	15,89
I”	2.492	525	13,08
J”	2.532	475	12,02
K”	2.388	425	10,15
L”	2.201	375	8,25
M”	1.083	325	3,52
$\sum$			216,23

$$\text{Precipitación} = \frac{\sum \text{ Volumen}}{\sum \text{ Superficie}} = \frac{216{,}23 \ Hm^3}{33.445 \ Hm^2} = 0{,}00647 \ Hm = 647 \ mm$$


900
A
850
B
C
800
D
B
750
E
700
F
650
G
600
H
550
I
500
J
450
K
400
L
350
M
300

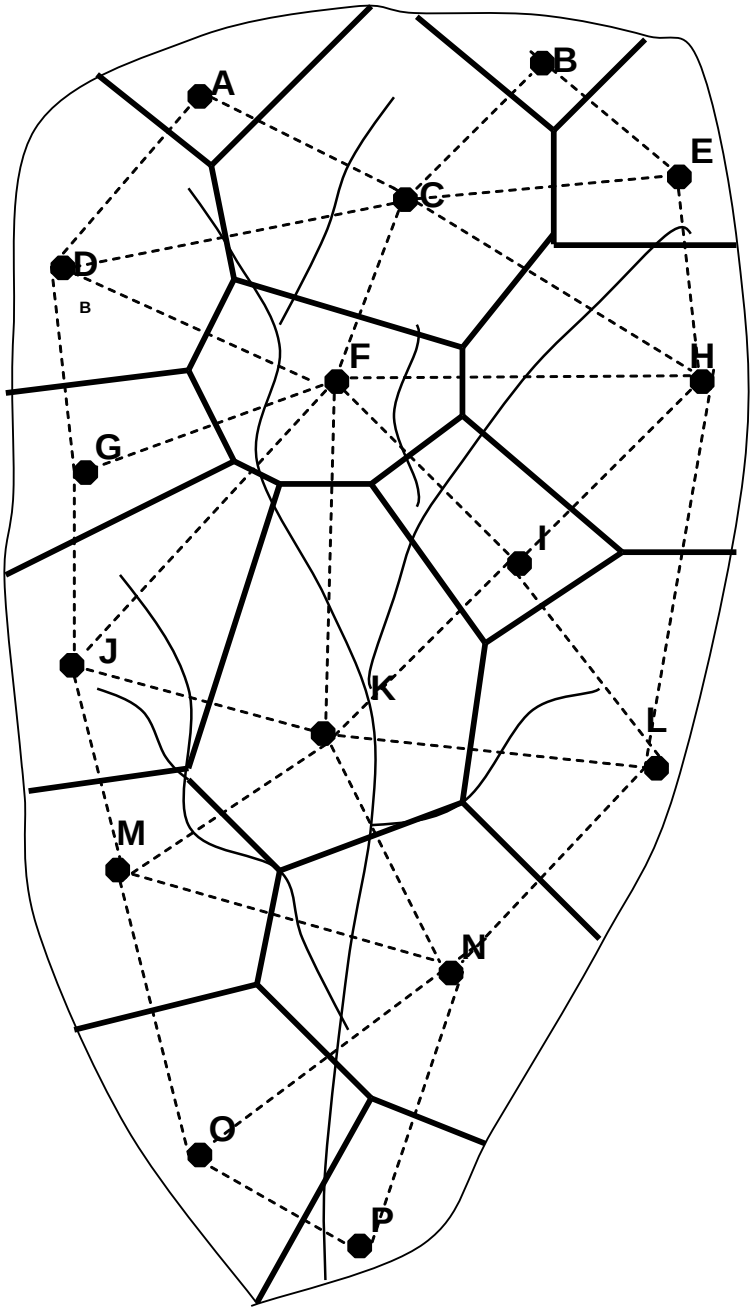
Método de Thiessen

Atribuye la precipitación en cada pluviómetro a un área de influencia determinada por polígonos irregulares construidos de la siguiente forma: se unen tres estaciones contiguas, conformando un triángulo; se trazan las medianas a cada lado, obteniéndose los lados de cada polígono, resueltos mediante la intersección de las medianas. Una vez obtenidos los polígonos, se miden su superficie y se multiplica el valor de cada área, por el valor de la precipitación del pluviómetro incluido en la misma, lográndose de tal forma un volumen. Dividiendo la sumatoria de los volúmenes por el área total de la cuenca, se obtiene la altura media buscada.

Este método resulta eficaz cuando la morfología del terreno es llana, ya que una topografía abrupta invalidaría el razonamiento eminentemente planar del área de influencia de cada pluviómetro. En el caso de polígonos cuya extensión exceda los límites de la cuenca, se mide el área encerrada por los lados y el borde de la cuenca.

ESTACION	Superficie (Ha)	Precipitación (mm)	Volumen (Hm^3)
A	1.682	886	14,9
B	1.110	891	9,89
C	2.837	875	24,82
D	1.843	809	14,91
E	1.839	804	14,78
F	2.559	787	20,14
G	1.366	713	9,74
H	1.853	763	14,14
I	3.069	664	20,38
J	2.071	624	12,92
K	2.894	556	16,09
L	2.596	503	13,06
M	2.120	443	9,39
N	2.683	420	12,27
O	1.592	361	5,75
P	1.341	303	4,06
$\sum$			216,24

$$\text{Precipitación} = \frac{\sum \text{Volumen}}{\sum \text{Superficie}} = \frac{216{,}24\ \text{Hm}^3}{33.445\ \text{Hm}^2} = 0{,}00646\ \text{Hm} = 646\ \text{mm}$$



Precipitación efectiva

La precipitación que recibe un suelo infiltrará en mayor o menor proporción de acuerdo con una serie de factores entre los que figuran: la pendiente, la vegetación que lo cubre, la textura, el contenido de humedad de las capas superficiales, la intensidad y cantidad de agua caída, etc. Los métodos para estimar la cantidad de agua que se añade al almacenaje de un suelo con cada precipitación son muchos y cada uno de ellos toma sólo algunos de los factores mencionados, por lo que sus resultados suelen ser dispares.

La utilización de uno u otro método queda a elección del técnico, de acuerdo con los datos que se posean de la zona en estudio, o a la mayor o menor confiabilidad que le merezcan los mismos. También puede realizarse el cálculo por distintos métodos y tomar luego el promedio de los resultados obtenidos.

Método del U.S. Bureau of Reclamation

Es un método descrito por Stamm (1967), se recomienda para las regiones áridas y semiáridas y utiliza la precipitación estacional media de los cinco años consecutivos más secos. El único factor que toma en cuenta es la cantidad de agua caída. A tal efecto los mm de precipitación real se expresan en una escala creciente de 25 en 25 mm. **(Columna 1)** A cada incremento de 25 mm se le otorga un coeficiente de aprovechamiento decreciente. **(Columna 2)**. De esa manera queda confeccionado el siguiente cuadro:

Columna 1 Rango de precipitación (mm)	**Columna 2** Porcentaje de efectividad	Precipitación efectiva (mm) (acumulado anterior + incremento efectivo)
0 – 25	90	25 x 0,9 = 22,5
> 25 – 50	85	22,5 + 25 x 0,85 = 43,75
> 50 – 75	75	43,75 + 25 x 0,75 = 62,5
> 75 – 100	50	62,5 + 25 x 0,50 = 75,0
> 100 – 125	30	75,0 + 25 x 0,30 = 82,5
> 125 – 150	10	82,5 + 25 x 0,10 = 85,0
> 150	0	85,0 + 25 x 0 = 85,0

La precipitación efectiva se deduce entonces, como la sumatoria del volumen acumulado anterior y el incremento efectivo para ese rango. Por ejemplo, a una precipitación real de 45 mm, le correspondería una precipitación efectiva de 39,5 mm.

25 mm x 0,90 = 22,5 mm

20 mm x 0,85 = 17,0 mm

45 mm 39,5 mm

A una precipitación real de 150 mm, le corresponderían 85 mm de precipitación efectiva.

Método de Blaney y Criddle

Es muy similar al anterior, sólo varían ligeramente los coeficientes de aprovechamiento

Precipitación (mm)	Coeficiente de aprovechamiento	Precipitación efectiva (mm)
0 – 25	95	25 x 0,95 = 23,75
> 25 – 50	90	23,75 + 25 x 0,90 = 46,25
> 50 – 75	82	46,25 + 25 x 0,82 = 66,75
> 75 – 100	65	66,75 + 25 x 0,65 = 83,0
> 100 – 125	45	83,0 + 25 x 0,45 = 94,25
> 125 – 150	25	94,25 + 25 x 0,25 = 100,25
> 150	5	100,25 + 25 x 0,05 = 101,75

Método del Soil Conservation Service USDA (Servicio de Conservación de Suelos del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos)

En este caso las variables que intervienen son la precipitación total, la evapotranspiración y la humedad del suelo.

Trabajando para lapsos de un mes, a partir de datos de precipitación total y evapotranspiración (aporte y consumo mensuales de agua) se ingresa a la **Tabla 1,** la cual permite obtener directamente la Pe.

Como esta tabla ha sido construida para una capacidad de almacenaje (tercer variable) de 75 mm, para otras capacidades será necesario convertir ese valor mediante un factor que puede obtenerse de la **Tabla 2.**

Por ejemplo: Durante la etapa de macollaje de la variedad de trigo Leones Inta se ha determinado un requerimiento hídrico máximo promedio de 84 mm. En ese mismo período se determinó una precipitación promedio de 53 mm. Considerando una capacidad de almacenaje de 40 mm, determinaremos la Pe para ese período.

Tabla Nº 1 Para capacidades de almacenamiento de 75 mm

Precipitación efectiva mensual media en relación con la precipitación mensual media y el consumo mensual medio (USDA-SCS)

Precipitación media	**Consumo promedio mensual de agua (mm) Evt**													
Mensual mm	**25**	**50**	**75**	**100**	**125**	**150**	**175**	**200**	**225**	**250**	**275**	**300**	**325**	**350**
	PRECIPITACION EFECTIVA MEDIA MENSUAL (mm)													
12.5	7.5	8.0	8.7	9.0	9.2	10.0	10.5	11.2	11.7	12.5	12.5	12.5	12.5	12.5
25.0	15.0	16.2	17.5	18.0	18.5	19.7	20.5	22.0	24.5	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0
37.5	22.5	24.0	26.2	27.5	28.2	29.2	30.5	33.0	36.2	37.5	37.5	37.5	37.5	37.5
50.0	25	32.2	34.5	35.7	36.7	39.0	40.5	43.7	47.0	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0
62.5	25	39.7	42.5	44.5	46.0	48.5	50.5	53.7	57.5	62.5	62.5	62.5	62.5	62.5
75.0	25	46.2	49.7	52.7	55.0	57.5	60.2	63.7	67.5	73.7	75.0	75.0	75.0	75.0
87.5	25	50.0	56.7	60.2	63.7	66.0	69.7	73.7	77.7	84.5	87.5	87.5	87.5	87.5
100.0	25	50.0	63.7	67.7	72.0	74.2	78.7	83.0	87.7	95.0	100	100	100	100
112.5	25	50.0	70.5	75.0	80.2	82.5	87.2	92.7	98.0	105	111	112	112	112
125.0	25	50.0	75.0	81.5	87.7	90.5	95.7	102	108	115	121	125	125	125
137.5	25	50.0	75.0	88.7	95.2	98.7	104	111	118	126	132	137	137	137
150.0	25	50.0	75.0	95.2	102	106	112	120	127	136	143	150	150	150
162.5	25	50.0	75.0	100	109	113	120	128	135	145	153	160	162	162
175.0	25	50.0	75.0	100	115	120	127	135	143	154	164	170	175	175
187.5	25	50.0	75.0	100	121	126	134	142	151	161	170	179	185	187
200.0	25	50.0	75.0	100	125	133	140	148	158	168	178	188	196	200
225	25	50.0	75.0	100	125	144	151	160	171	182				
250	25	50.0	75.0	100	125	150	161	170	183	194				
275	25	50.0	75.0	100	125	150	171	181	194	205				
300	25	50.0	75.0	100	125	150	175	190	203	215				
325	25	50.0	75.0	100	125	150	175	198	213	224				
350	25	50.0	75.0	100	125	150	175	200	220	232				
375	25	50.0	75.0	100	125	150	175	200	225	240				
400	25	50.0	75.0	100	125	150	175	200	225	247				
425	25	50.0	75.0	100	125	150	175	200	225	250				
450	25	50.0	75.0	100	125	150	175	200	225	250				

Por interpolación en la **Tabla 1** se obtiene un valor de Pe mensual de 35,6 mm. A partir de este dato, remitiéndonos a la **Tabla 2,** observamos que para una capacidad de almacenaje de 40 mm se corresponde una corrección de 0,876. Luego:

35,6 mm x 0,876 = 31,2 mm

De esta manera se advierte que para las condiciones señaladas, la Pe en el período de macollaje ha sido de 31,2 mm.

Tabla Nª 2 Coeficiente de ajuste de la precipitación efectiva según la capacidad de almacenaje del suelo para una profundidad de raíces dada.

W alm (mm)	Factor	W alm (mm)	Factor	W alm (mm)	Factor
10,00	0,620	31,25	0,818	70,00	0,990
12,50	0,650	32,50	0,826	75,00	1,000
15,00	0,676	35,00	0,842	80,00	1,004

17,50	0,703	37,50	0,860	85,00	1,008
18,75	0,720	**40,00**	**0,876**	90,00	1,012
20,00	0,728	45,00	0,905	95,00	1,016
22,50	0,749	50,00	0,930	100,00	1,020
25,00	0,770	55,00	0,947	125,00	1,040
27,50	0,790	60,00	0,963	150,00	1,060
30,00	0,808	65,00	0,977	175,00	1,070

Evapotranspiración de los cultivos

La evapotranspiración (Et) es un flujo de materia componente del ciclo hidrológico. Integra las salidas de agua hacia la atmósfera por evaporación desde el suelo y desde las superficies vegetales que interceptan y retienen agua libre y por transpiración del agua absorbida por las plantas.

Perrier (1984) define la Et como la pérdida total de agua de una cubierta vegetal bajo la forma de vapor a través de la evaporación y transpiración durante un intervalo de tiempo dado.

El desarrollo del conocimiento en los campos de la fisiología, la micrometeorología y la hidrología agrícola, la disponibilidad del instrumental de medición y los avances en la modelización matemática, permiten hoy comprender las relaciones causa efecto de la Et en el marco de las relaciones agua suelo planta atmósfera, medir y pronosticar la magnitud del fenómeno y ampliar su campo de aplicación con más precisión en la problemática del riego y el drenaje.

Desde un punto de vista cuantitativo, puede asumirse que los términos evapotranspiración potencial Etp, evapotranspiración de referencia Eto y uso consuntivo Uc, se refieren a una misma cantidad de flujo de agua que pasa a la atmósfera desde un suelo bien provisto de agua donde vegetan activamente gramíneas que cubren dicho suelo.

La evapotranspiración de un cultivo determinado Etc puede superar la Eto y de hecho frecuentemente esto ocurre, ya que principalmente la superficie foliar transpirante (por ejemplo indicado por el IAF índice de área foliar) de muchos cultivos es superior al de un cultivo herbáceo de gramíneas pratenses.

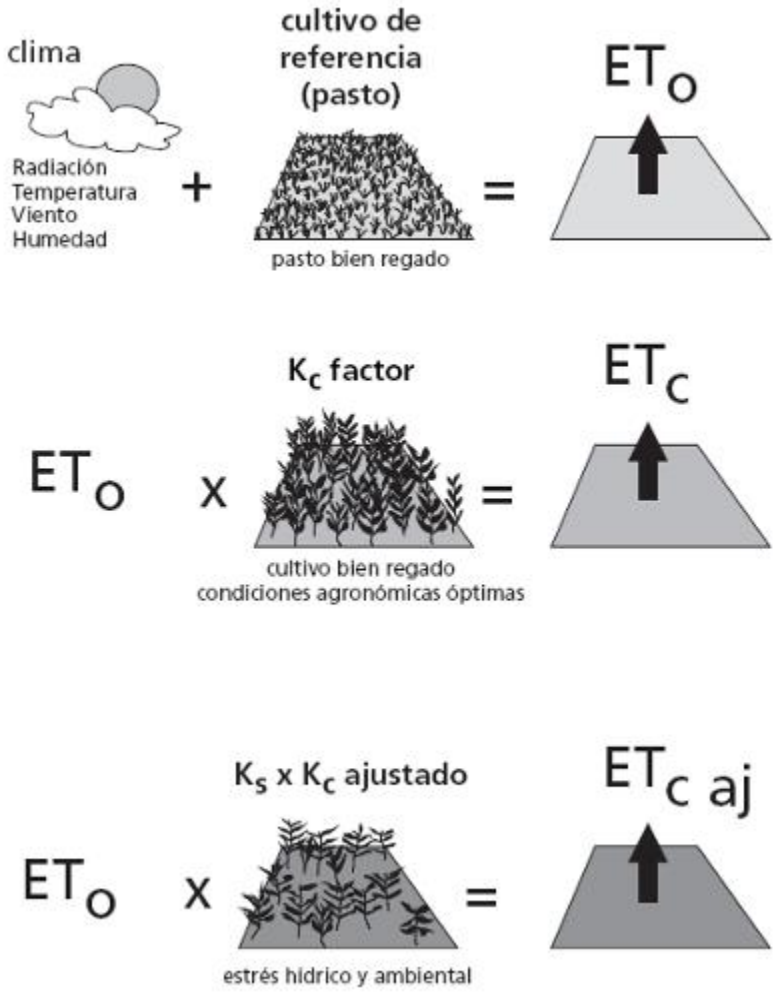
La evapotranspiración máxima es la mayor evapotranspiración que puede presentar una superficie extensa vegetada; no debe confundirse con la Etp, que en realidad

puede significar la demanda hídrica atmosférica de una determinada localidad, que no tiene porqué ser la más alta Et.

El cociente entre la Etc y la Eto se denomina coeficiente de cultivo. Puede ser obtenido experimentalmente a partir de mediciones lisimétricas de la Et de un cultivo determinado y una gramínea y generalmente es estimado a partir de modelos matemáticos, nomogramas, gráficas, información tabulada, procedimientos combinados, etc. Generalmente el rango de variación del kc es de 0,3 a 1,3. Se utiliza generalmente para predecir valores de Etc a partir de valores zonales de Eto, estimados mediante el uso de modelos matemáticos y programas computacionales. Este tema será ampliado más adelante en la presente guía.

Conociendo la tasa de Et de un cultivo puede estimarse su necesidad de agua y elaborarse los programas operativos de riego.

La Et puede medirse con instrumental y procedimientos adecuados o estimarse utilizando modelos matemáticos.



Clasificación de métodos de medición de la Et

1.1 Métodos directos:	-Lisimetría	- lisímetros volumétricos
		- lisímetros de pesada
1.2 Métodos indirectos:	-Micrometeorologías	- aerodinámicos
		- balance de energía (Bowen)
		- sensores remotos
	- Fisiológicos	
	- Balance hídrico del suelo	

Lisimetría: medición de la evaporación o evapotranspiración desde un recipiente lleno de suelo, disturbado o no, desnudo o con vegetación (césped u otros cultivos), mediante diferencias de pesadas o balances de entradas y salidas de agua. La lisimetría es considerada el método patrón con el cual se calibran los otros métodos de medición indirecta o estimación de la evapotranpiración.

Foto1 Lisímetro volumétrico o evapotransporímetro

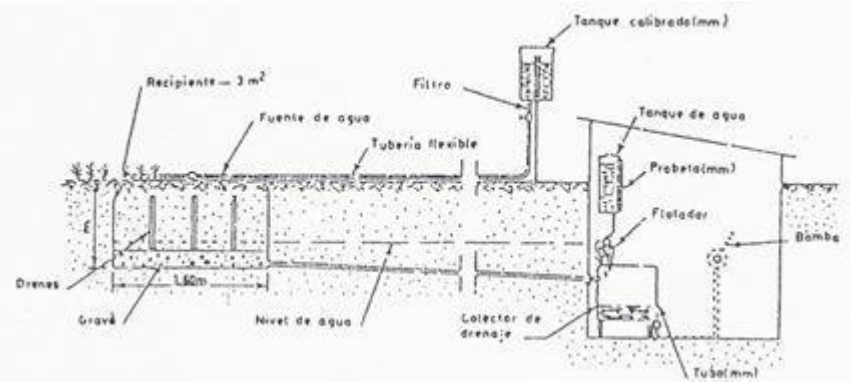
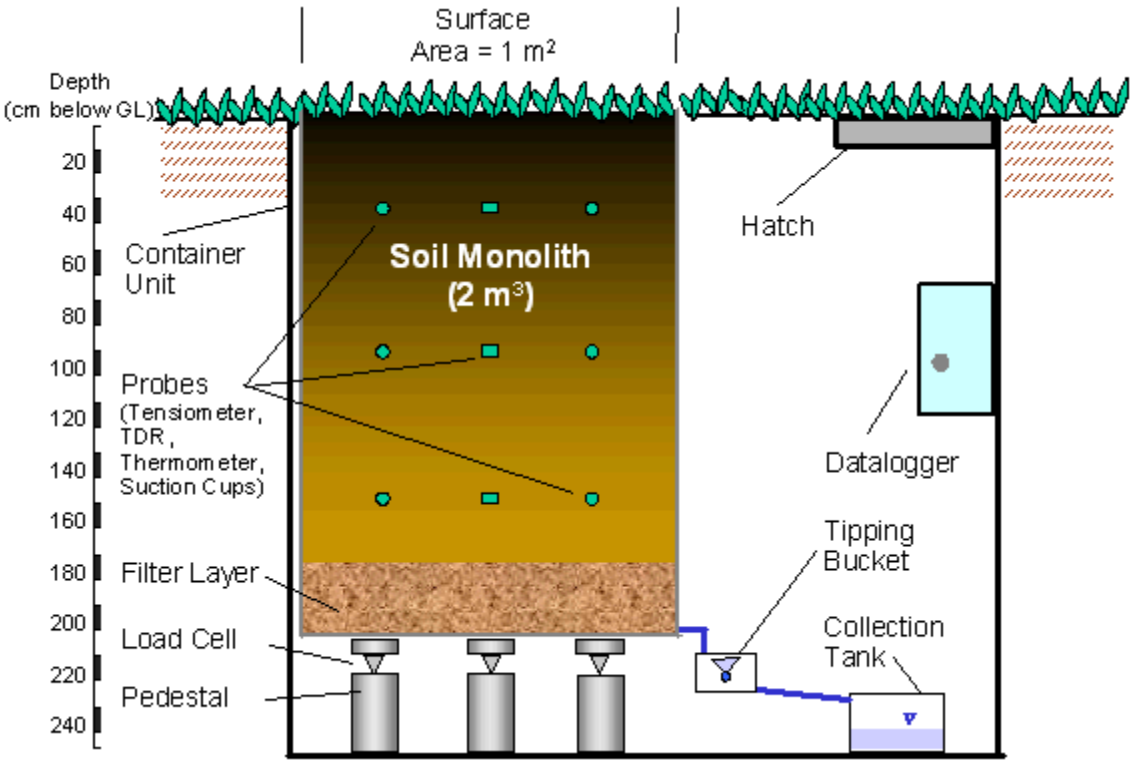


Foto 2 Lisímetro de pesada



<u>Métodos micrometeorológicos:</u> Utilizan instrumental menos oneroso y más práctico que los lisímetros, además de no alterar el medio donde se realizan las mediciones, con las que se calcula la transferencia de vapor de agua en la capa limite atmosférica.

Se miden variaciones micrometeorológicas como temperatura y humedad del aire, radiación, velocidad del viento, etc., registrándolas con instrumental adecuado en y sobre superficies evaporantes, como suelo húmedo, espejos de agua y coberturas vegetales.

Los métodos aerodinámicos estiman la transferencia turbulenta del vapor de agua en las cercanías de la cubierta vegetal, a través de mediciones del gradiente de humedad del aire y velocidad del viento, con los que se calcula el flujo de calor latente de evaporación.

<u>Método de balance de energía:</u> utiliza la relación de Bowen y estima la cantidad de calor latente necesario para producir vaporización, por medio de la ecuación del balance de energía.

<u>Métodos de sensores remotos:</u> utiliza radiómetros infrarrojos, fotografía aérea e imágenes satelitales para medir la temperatura de superficies (suelo y cubierta vegetal) y con esta variable definir el calor sensible involucrado en ecuaciones de balance de energía. Están en pleno desarrollo.

Métodos fisiológicos: se han desarrollado fundamentalmente para conocer las pérdidas de agua por transpiración de parte de una planta, de un individuo o de un conjunto de plantas; utilizando diversas técnicas entre las que se pueden citar termometría, diferencias de concentración de trazadores (colorantes o isótopos), balances energéticos, etc.

Clasificación de métodos de estimación de la Et

El pronóstico o estimación de la Et involucra técnicas de ajuste estadístico de datos que permitan construir modelos matemáticos empíricos o la modelización matemática a partir de razonamientos físicos y fisiológicos en base a hipótesis lógicas. No existe aun el método universal de estimación que establezca valores de Et adecuados a la información climática a nivel local o regional. Los modelos construidos requieren datos climáticos de distinta complejidad y precisión y siempre deberán validarse o calibrarse con valores de Et medidos por lisimetría, que es el único método patrón.

Una clasificación de modelos disponibles para la estimación de Et a partir de información climática o meteorológica, está dada por la naturaleza de dicha información.

Modelos basados en la temperatura

Thornthwaite (1958)

Blaney - Criddle (1950)

Thornthwaite - Matter (1955)

Blaney - Criddle mode FAO (1974)

Modelos basados en la humedad del aire

Papadakis (1961)

Hamon (1961)

Halstead (1951)

Modelos basados en la radiación solar global

Markkink (1957)

Turc (1961)

Jensen y Haise (1963)

Hargreaves (1976)

Hargreaves y Samani (1987)

Doorembos y Puitt (1974)

Modelos basados en la combinación de procesos de balance y transferencia turbulenta

Penman (1948)

Penman - Monteith (1965)

Penman - FAO (1974)

Priestly y Taylor (1975)

Modelos basados en la evaporación

Boucehet (1963)

Doorembos y Pruitt (1975)

Christiansen y Hargreaves (1970)

Calculo de la evapotranspiración del cultivo de referencia Eto

Método de Blaney - Criddle

La ecuación de Blaney - Criddle (1950) es uno de los métodos más ampliamente utilizados para calcular las necesidades de agua de un cultivo, sobre todo en aquellas zonas donde solo se dispone de datos de temperatura media del aire.

El método original utiliza valores medios de temperatura (ºt) y el porcentaje de horas diurnas (p) que es función de la latitud y la época del año, como únicas variables climáticas para predecir la Evt, oportunamente llamada por sus autores " uso consuntivo", aunque debemos aclarar que el termino es equivalente al de Eto.

Posteriormente técnicos de la FAO, a partir del modelo original incorporan otras variables: humedad relativa mínima, insolación y velocidad del viento, con el fin de lograr una predicción mejorada de los efectos del clima sobre la EVT.

El ejemplo siguiente muestra la metodología propuesta por FAO para obtener el valor de Eto a partir del modelo de Blaney - Criddle, para la localidad de Chilecito (La Rioja) y para el mes de enero, a partir de los siguientes datos:

Latitud: 29º sur

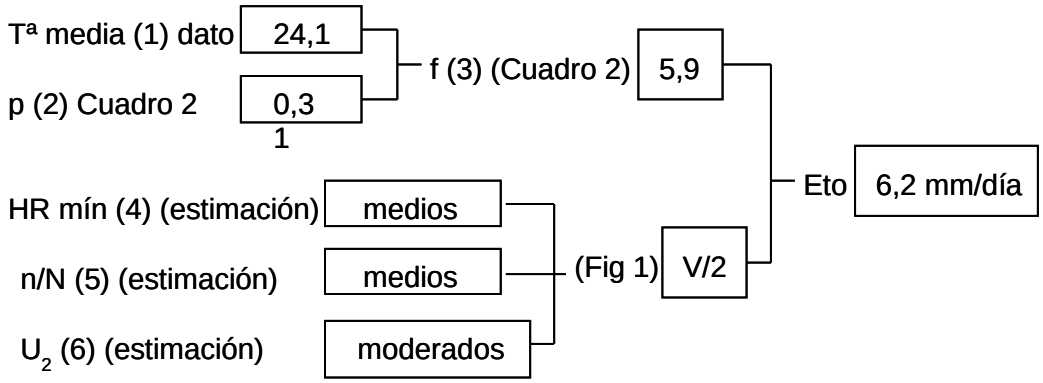
Temperatura media: 24,1 ºC

N/N: 0,61

Velocidad del viento: 2,15 m/s

Humedad relativa mínima: 40%

(1) temperatura media me



nsual: obtenida a partir de valores medios diarios o a partir de la semisuma de las temperaturas medias máximas y mínimas mensuales **DATO**

(2) porcentaje diario de horas diurnas anuales a diferentes latitudes (p) **CUADRO 1**

(3) factor de uso consuntivo: **f = p (0,46 t + 8,13)** variable obtenida para las diferentes temperaturas en ºC y porcentajes diarios de horas diurnas anuales **CUADRO 2** y **CALCULO**

(4) humedad relativa mínima: datos de higrografos. Para su estimación se restara un 10% la HR de las 12 horas A.M., en climas húmedos y un 30% en climas desérticos. La HR es:

baja: menor 20%

media: entre 20 y 50%

alta: mayor 50%

ESTIMACIÓN

(5) n/N relación entre las horas reales diarias (n) y las máximas posibles (N) de insolación. La relación es:

alta: mayor 0,8 (menos de 1,5 octas de nubosidad)

media: entre 0,6 y 0,8 (entre 1,5 y 4 octas de nubosidad)

baja: menor 0,6 (mas de 4 octas de nubosidad)

Para facilitar la consecución de los diferentes valores de la relación n/N, puede utilizarse la siguiente tabla, que vincula la anterior relación con valores de nubosidad expresados en octas, frecuentes en estadísticas climatológicas.

Nubosidad (octas)	0	1	2	3	4	5	6	7	8
n/N	0,95	0,85	0,75	0,65	0,55	0,45	0,35	0,15	0,00

ESTIMACION

(6) velocidad del viento diurno a 2 m de altura expresado en m7s. Los vientos serán de carácter:

fuerte: mayor de 5m/s

moderado: entre 2 y 5 m/s

débil: menor de 2m/s

ESTIMACION

Los datos proporcionados por el Servicio Meteorológico Nacional expresan la velocidad del viento en km/hora y a 10 m de altura, por lo tanto deberán corregirse las unidades (m/s) y afectar ese valor por el factor **f** para obtener un dato equivalente a 2m de altura.

Altura de medición	0,50	1,00	1,50	2,00	3,00	5,00	10,00
Factor **f** de corrección	1,35	1,15	1,06	1,00	0,93	0,85	0,77

Planilla tipo para el cálculo de Eto con el método de Blaney – Criddle modificado por FAO .

Localidad:.....

Latitud:..... Altitud:.....

Meses	**f (1)**	**p (2)**	**f (3)**	**H Rm (4)**	**n/N (5)**	**U_2 (6)**	**Eto**
Julio							
Agosto							
Septiembre							
Octubre							
Noviembre							
Diciembre							
Enero							
Febrero							
Marzo							
Abril							
Mayo							
Junio							

(1) temperatura media mensual
(2) porcentaje diario de horas diurnas anuales
(3) factor de uso consuntivo
(4) humedad relativa media
(5) relación horas reales diarias y máximas posibles de insolación

(6) velocidad del viento

<u>Cuadro 1</u> Porcentaje diario medio (p) de horas diurnas anuales a diferentes latitudes

Latitud Norte	En.	Feb.	Mar.	Abr.	Mayo	Jun.	Jul.	Ag.	Sept.	Oct.	Nov.	Dic.
Latitud Sur	**Jul.**	**Ag.**	**Sept.**	**Oct.**	**Nov.**	**Dic.**	**En.**	**Feb.**	**Mar.**	**Abr.**	**Mayo**	**Jun.**
60ª	0,15	0,20	0,26	0,32	0,38	0,41	0,40	0,34	0,28	0,22	0,17	0,13
58ª	0,16	0,21	0,26	0,32	0,37	0,40	0,39	0,34	0,28	0,23	0,18	0,15
56ª	0,17	0,21	0,26	0,32	0,36	0,39	0,38	0,33	0,28	0,23	0,18	0,16
54ª	0,18	0,22	0,26	0,31	0,36	0,38	0,37	0,33	0,28	0,23	0,19	0,17
52ª	0,19	0,22	0,27	0,31	0,35	0,37	0,36	0,33	0,28	0,24	0,20	0,17
50ª	0,19	0,23	0,27	0,31	0,34	0,36	0,35	0,32	0,28	0,24	0,20	0,18
48ª	0,20	0,23	0,27	0,31	0,34	0,36	0,35	0,32	0,28	0,24	0,21	0,19
46ª	0,20	0,23	0,27	0,30	0,34	0,35	0,34	0,32	0,28	0,24	0,21	0,20
44ª	0,21	0,24	0,27	0,30	0,33	0,35	0,34	0,31	0,28	0,25	0,22	0,20
42ª	0,21	0,24	0,27	0,30	0,33	0,34	0,33	0,31	0,28	0,25	0,22	0,21
40ª	0,22	0,24	0,27	0,30	0,32	0,34	0,33	0,31	0,28	0,25	0,22	0,21
35ª	0,23	0,25	0,27	0,29	0,31	0,32	0,32	0,30	0,28	0,25	0,23	0,22
30	0,24	0,25	0,27	0,29	0,31	0,32	**0,31**	0,30	0,28	0,26	0,24	0,23
25ª	0,24	0,26	0,27	0,29	0,30	0,31	0,31	0,29	0,28	0,26	0,25	0,24
20ª	0,25	0,26	0,27	0,28	0,29	0,30	0,30	0,29	0,28	0,26	0,25	0,25
15ª	0,26	0,26	0,27	0,28	0,29	0,29	0,29	0,28	0,28	0,27	0,26	0,25
10ª	0,26	0,27	0,27	0,28	0,28	0,29	0,29	0,28	0,28	0,27	0,26	0,26
5ª	0,27	0,27	0,27	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,27	0,27	0,27
0ª	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27

<u>Cuadro 2</u> Valores del factor f de Blaney – Criddle para diferentes temperaturas y porcentaje diario de horas diurnas anuales.

tª C p%	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	32	34	36	38	40
0,14	1,1	1,3	1,4	1,5	1,7	1,8	1,9	2,0	2,2	2,3	2,4	2,6	2,7	2,8	2,9	3,0	3,2	3,3	3,5	3,6	3,7
0,16	1,3	1,4	1,6	1,7	1,9	2,0	2,2	2,3	2,5	2,6	2,8	2,9	3,1	3,2	3,4	3,5	3,7	3,8	4,0	4,1	4,2
0,18	1,5	1,6	1,8	2,0	2,1	2,3	2,5	2,6	2,8	3,0	3,1	3,3	3,5	3,6	3,8	3,9	4,1	4,3	4,4	4,6	4,8
0,20	1,6	1,8	2,0	2,2	2,4	2,5	2,7	2,9	3,1	3,3	3,5	3,7	3,8	4,0	4,2	4,4	4,6	4,8	4,9	5,1	5,3
0,22	1,8	2,0	2,2	2,4	2,6	2,8	3,0	3,2	3,4	3,6	3,8	4,0	4,2	4,4	4,6	4,8	5,0	5,2	5,4	5,6	5,8
0,24	2,0	2,2	2,4	2,6	2,8	3,1	3,3	3,5	3,7	3,9	4,2	4,4	4,6	4,8	5,0	5,3	5,5	5,7	5,9	6,1	6,4
0,26	2,1	2,4	2,6	2,8	3,1	3,3	3,5	3,8	4,0	4,3	4,5	4,7	5,0	5,2	5,5	5,7	5,9	6,2	6,4	6,7	6,9
0,28	2,3	2,5	2,8	3,0	3,3	3,6	3,8	4,1	4,3	4,6	4,9	5,1	5,4	5,6	5,9	6,1	6,4	6,7	6,9	7,2	7,4
0,30	2,4	2,7	3,0	3,3	3,5	3,8	4,1	4,4	4,6	4,9	5,2	5,5	5,8	6,0	6,3	6,6	6,9	7,1	7,4	7,7	8,0
0,32	2,6	2,9	3,2	3,5	3,8	4,1	4,4	4,7	5,0	5,3	5,5	5,8	6,1	6,4	6,7	7,0	7,3	7,6	7,9	8,2	8,5
0,34	2,8	3,1	3,4	3,7	4,0	4,3	4,6	5,0	5,3	5,6	5,9	6,2	6,5	6,8	7,1	7,5	7,8	8,1	8,4	8,7	9,0
0,36	2,9	3,3	3,6	3,9	4,3	4,6	4,9	5,2	5,6	5,9	6,2	6,6	6,9	7,2	7,6	7,9	8,2	8,6	8,9	9,2	9,6
0,38	3,1	3,4	3,8	4,1	4,5	4,8	5,2	5,5	5,9	6,2	6,6	6,9	7,3	7,6	8,0	8,3	8,7	9,0	9,4	9,7	10,1
0,40	3,3	3,6	4,0	4,4	4,7	5,1	5,5	5,8	6,2	6,6	6,9	7,3	7,7	8,0	8,4	8,8	9,1	9,5	9,9	10,2	10,6
0,42	3,4	3,8	4,2	4,6	5,0	5,3	5,7	6,1	6,5	6,9	7,3	7,7	8,1	8,4	8,8	9,2	9,6	10,0	10,4	10,8	11,1

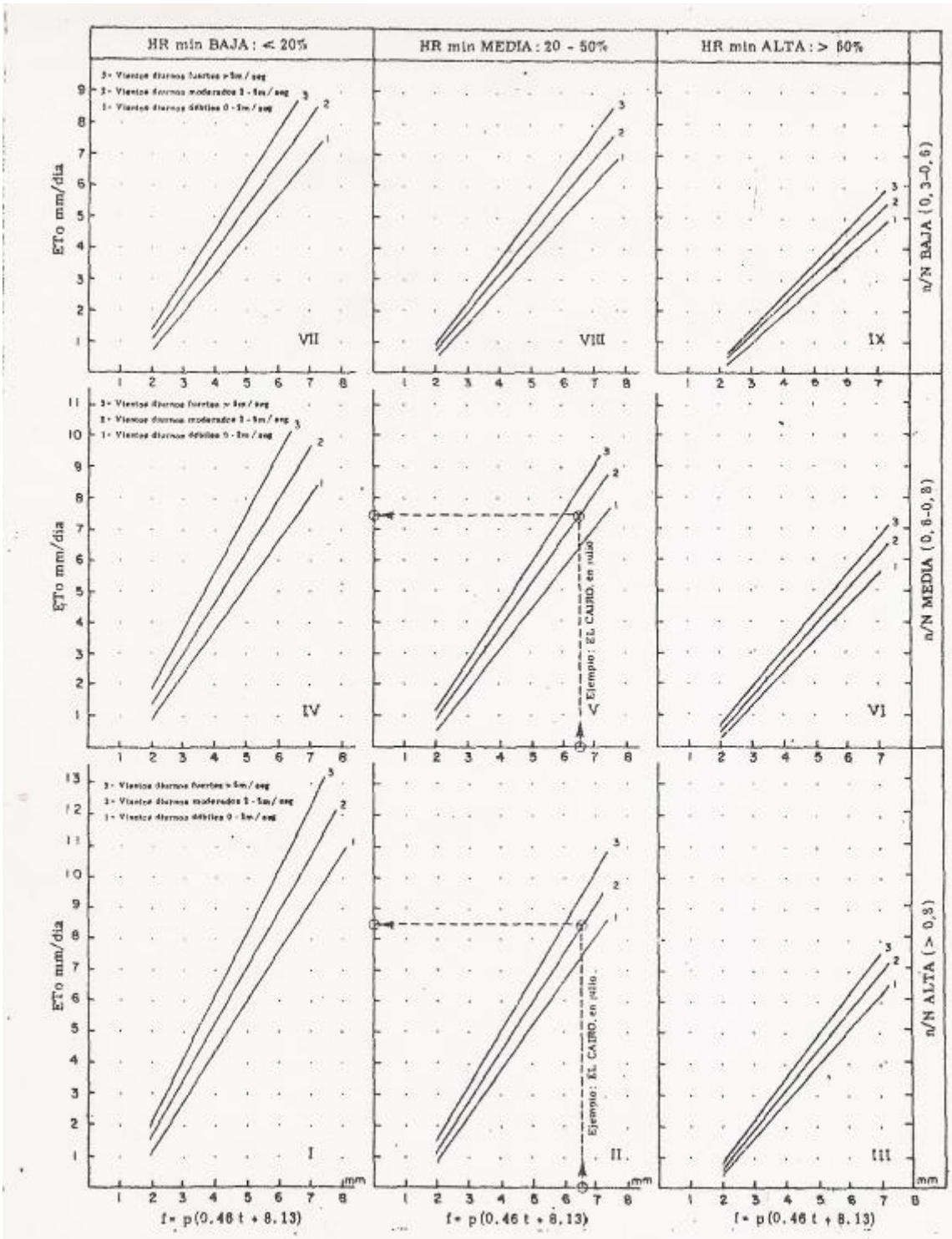


Fig. 1 Predicción de la ETo a partir del factor f de Blaney-Criddle, para diferentes condiciones de humedad relativa mínima, horas de insolación diarias y vientos diurnos.

Método de Penman modificado

Este método esta especialmente indicado para aquellas áreas en las que se disponga de datos medidos de temperatura, humedad, vientos y horas de fuerte insolación o radiación.

La ecuación original de Penman (1948) presentaba dos términos: el de la energía (radiación) y el aerodinámico (humedad y vientos). La importancia relativa de uno u otro termino es función de las condiciones climáticas locales.

Este método original ha sido modificado por técnicos de FAO y es en esta forma simplificada como se la presenta a continuación:

Eto = $[W.Rn + (1-W)\,f(u)(ea-ed)]$

A B

(A) termino de la radiación

(B) termino aerodinámico

En la actualidad este método se aplica en el programa CROPWAT que se encuentra en la página web de la FAO y que es gratuito.

(1) Presión de vapor (ea - ed). En este método, los valores de humedad del aire se expresan como déficit a la presión de saturación de vapor (ea - ed), es decir, la diferencia entre la presión saturante de vapor de agua (ea) y la presión real del vapor medio del agua. (ed).

(2) Función del viento f(u)

(3) Factor de ponderación (1 - W) y W. Estima los efectos de la radiación sobre la Eto a diferentes temperaturas y altitudes

(4) Radiación neta (Rn) En términos de balance, la Rn es la diferencia entre toda la radiación entrante y toda la saliente. Es medible, aunque raramente se disponga de los datos.

(5) factor de corrección (c) Existirá siempre una diferencia entre la Eto real y la calculada bajo condiciones de trabajo que no sean aquellas vistas anteriormente. Tales situaciones serian por ejemplo alta radiación, humedad relativa máxima cercana al 70% y vientos diurnos moderados y aproximadamente el doble de los nocturnos.

Coeficiente de desarrollo del cultivo (Kc)

Si bien, como ya hemos visto anteriormente, existen métodos que permiten arribar a estimaciones de Eto, en la ingeniería de riego y drenaje se exige el conocimiento de la evapotranspiración real (Etc). De ambas surge la relación llamada Kc, definida como:

$$Kc = Etc / Eto$$

Y constituye el factor de ajuste de la demanda evapotranspirativa del cultivo. Precisamente las diferencias existentes para una misma zona, entre Etc y Eto son debidas a las características del cultivo, la duración del período vegetativo y el ritmo de su desarrollo, las fechas de siembra, transplante o plantación, las condiciones climáticas, la frecuencia de las precipitaciones o riegos que inciden en la disponibilidad hídrica, etc.

Podría resumirse que el Kc es el producto de tres coeficientes que engloban factores que lo modifican, de acuerdo a:

$$Kc = kcp \times kcs \times kcc \quad \text{siendo}$$

Kc = coeficiente de desarrollo del cultivo

kcp = coeficiente de ajuste debido a características vegetales.

kcs = coeficiente de ajuste debido a disponibilidad hídrica del suelo.

kcc = coeficiente de ajuste debido a las condiciones climáticas.

Los valores más confiables de Kc se obtienen por medición de Etc en lisímetros o parcelas de ensayo y determinaciones de Eto. Esto supone acceso a trabajos experimentales, ni numerosos ni difundidos.

Métodos para la obtención de Kc

A partir de valores de Kc globales (KG)

Blaney y Criddle (1950) propusieron los KG que figuran en el cuadro siguiente, los cuales permiten llegar a valores de Etc para todo el ciclo del cultivo.

$$Etc = KG \times Eto$$

siendo Eto en este caso, el calculado para todo el período de desarrollo del vegetal.

Valores de KG según Blaney Cridle (1950)

Cultivo	Crecim vegetativo	KG	Cultivo	Crecim vegetativo	KG
Aguacate	Todo el año	0,50 a 0,55	Haba	4 a 5 meses	0,60 a 0,70
Alfalfa	Entre heladas	0,80 a 0,85	Hortalizas	2 a 4 meses	0,6
Alfalfa	En invierno	0,6	Jitomate	4 meses	0,7
Algodón	6 a 7 meses	0,60 a 0,65	Lechuga	3 meses	0,7
Alpiste	3 a 6 meses	0,75 a 0,85	Lenteja	4 meses	0,60 a 0,70
Arroz	3 a 5 meses	1,00 a 1,20	Lino	7 a 8 meses	0,70 a 0,80
Avena	3 a 6 meses	0,75 a 0,85	Maíz	4 a 7 meses	0,75 a 0,85
Cacahuate	5 meses	0,60 a 0,65	Mango	Todo el año	0,75 a 0,80
Cacao	Todo el año	0,75 a 0,80	Melón	3 a 4 meses	0,6
Café	Todo el año	0,75	Nogal	Entre heladas	0,7
Camote	5 a 6 meses	0,6	Papa	3 a 5 meses	0,65 a 0,75
Caña de azúcar	Todo el año	0,75 a 0,90	Pastos de gramíneas	Todo el año	0,75
Carozo y pepita	Entre heladas	0,60 a 0,70	Pastos de trébol	Todo el año	0,80 a 0,85
Cebada	3 a 6 meses	0,75 a 0,85	Plátano	Todo el año	0,80 a 1,00
Centeno	3 a 6 meses	0,75 a 0,85	Remolacha	6 meses	0,65 a 0,75
Cítricos	7 a 8 meses	0,50 a 0,65	Sandía	3 a 4 meses	0,6
Espárrago	6 a 7 meses	0,6	Soja	3 a 5 meses	0,60 a 0,70
Fresa	Todo el año	0,45 a 0,60	Sorgo	3 a 5 meses	0,7
Frijol	3 a 4 meses	0,60 a 0,70	Tabaco	4 a 5 meses	0,70 a 0,80
Frutales tropical	Todo el año	0,75 a 0,80	Tomate	4 a 5 meses	0,7
Garbanzo	4 a 5 meses	0,60 a 0,70	Trigo	3 a 6 meses	0,75 a 0,85
Girasol	4 meses	0,50 a 0,65	Zanahoria	2 a 4 meses	0,6
Gladiola	3 a 4 meses	0,6			

Para discriminar los valores de Kc a partir de KG, para un momento determinado del ciclo, se utilizaron gráficos y tablas existentes en diferentes trabajos experimentales

Este método exige una interpolación del % del ciclo según sus días de duración, y efectuar una correspondencia con los meses del año en que se desarrolla el ciclo. Por ejemplo, se desea conocer la marcha del Kc de un cultivo de maíz, de 7 meses de duración (ciclo) sembrado a principios de octubre, con un KG = 0,80.

Para ello se grafica sobre ejes ortogonales, en las ordenadas, los valores de K de Grassi y Christiansen; y en las abscisas una escala de tiempo donde el ciclo de 7 meses constituye el 100%. Seguidamente se establecen 7 segmentos iguales, cuyo punto medio será 1/14 partes, etc.

Así:

Mes	Punto medio	% ciclo	Kc maíz
Octubre	1/14	7	0,253
Noviembre	3/14	21	0,601
Diciembre	5/14	35	0,828
Enero	7/14	50	0,984
Febrero	9/14	64	1,029

Marzo	11/14	78	0,995
Abril	13/14	92	0,873

De esta manera, por interpolación de los valores se obtienen Kc para un momento determinado del ciclo.

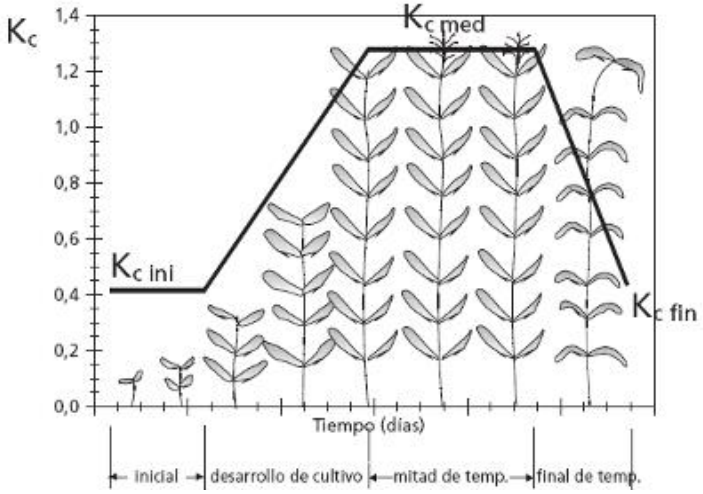
Valores de Kc en función del % del ciclo vegetativo.

Ciclo vegetativo %	Kg 0,35	Kg 0,40	Kg 0,45	Kg 0,50	Kg 0,55	Kg 0,60	Kg 0,65	Kg 0,70	Kg 0,75	Kg 0,80	Kg 0,85	Kg 0,90	Kg 0,95
10	**0,158**	**0,181**	**0,204**	**0,226**	**0,249**	**0,272**	**0,294**	**0,317**	**0,340**	**0,362**	**0,385**	**0,407**	**0,430**
20	**0,255**	**0,292**	**0,328**	**0,365**	**0,401**	**0,438**	**0,474**	**0,511**	**0,547**	**0,584**	**0,620**	**0,657**	**0,693**
30	**0,333**	**0,380**	**0,428**	**0,475**	**0,523**	**0,571**	**0,618**	**0,666**	**0,713**	**0,761**	**0,809**	**0,856**	**0,904**
40	**0,391**	**0,447**	**0,503**	**0,559**	**0,615**	**0,671**	**0,727**	**0,783**	**0,839**	**0,895**	**0,951**	**1,006**	**1,063**
50	**0,430**	**0,492**	**0,553**	**0,615**	**0,676**	**0,738**	**0,799**	**0,861**	**0,922**	**0,984**	**1,045**	**1,107**	**1,168**
60	**0,450**	**0,514**	**0,578**	**0,643**	**0,707**	**0,771**	**0,836**	**0,900**	**0,964**	**1,028**	**1,093**	**1,157**	**1,221**
70	**0,450**	**0,515**	**0,579**	**0,643**	**0,708**	**0,772**	**0,830**	**0,901**	**0,965**	**1,030**	**1,094**	**1,158**	**1,222**
80	**0,451**	**0,493**	**0,555**	**0,616**	**0,678**	**0,740**	**0,801**	**0,863**	**0,925**	**0,986**	**1,048**	**1,109**	**1,171**
90	**0,393**	**0,450**	**0,506**	**0,562**	**0,618**	**0,674**	**0,731**	**0,787**	**0,843**	**0,899**	**0,956**	**1,012**	**1,068**
100	**0,336**	**0,384**	**0,432**	**0,480**	**0,528**	**0,576**	**0,624**	**0,672**	**0,720**	**0,768**	**0,816**	**0,864**	**0,912**

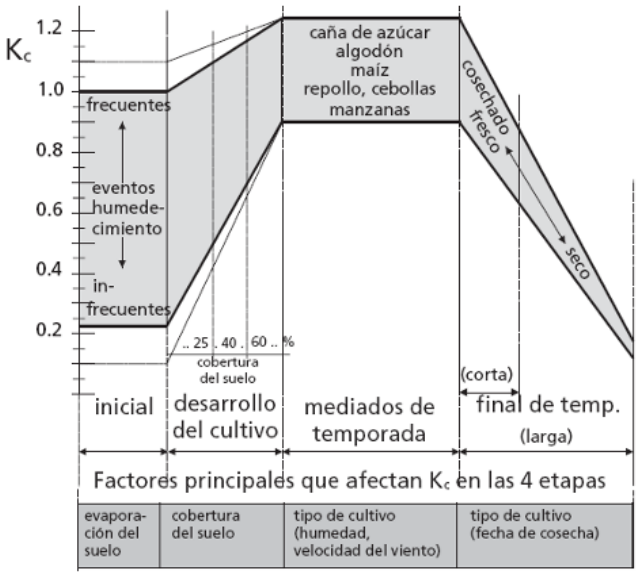
A partir de gráficos establecidos

Tal es el caso del método denominado "curva única de Hansen". En la misma se discrimina el porcentaje del ciclo del cultivo que figure en la curva, obteniéndose los valores de K deseados. Este método utiliza la relación Kc = Etc / Ea y solo es aplicable a cultivos considerados en la curva. También existen curvas de desarrollo específicas en ciertos cultivos, propuestos por diferentes autores.

Curva generalizada del coeficiente del cultivo, correspondiente al procedimiento del coeficiente único del cultivo



Rangos típicos esperados del valor de K_c para las cuatro etapas del crecimiento



A partir de modelos informáticos (Cropwat)

Climwat y Cropwat

Para estimar el requerimiento de agua de los cultivos (Etc) se utiliza software desarrollado por la División de Desarrollo de Tierras y Aguas (AGL) de la Organización para la Alimentación y la Agricultura de las Naciones Unidas (FAO) denominado Climwat 2.0 y CropWat 8.0. Este software es libre y se puede encontrar en:

http://www.fao.org/nr/water/infores_databases_climwat.html

http://www.fao.org/nr/water/infores_databases_cropwat.html

Las capacidades generales del programa prestan servicios para calcular:

- La evapotranspiración de referencia
- Las necesidades de agua de los cultivos
- Las necesidades de riego de los cultivos
- Las necesidades de riego de un sistema de riego multicultivo.

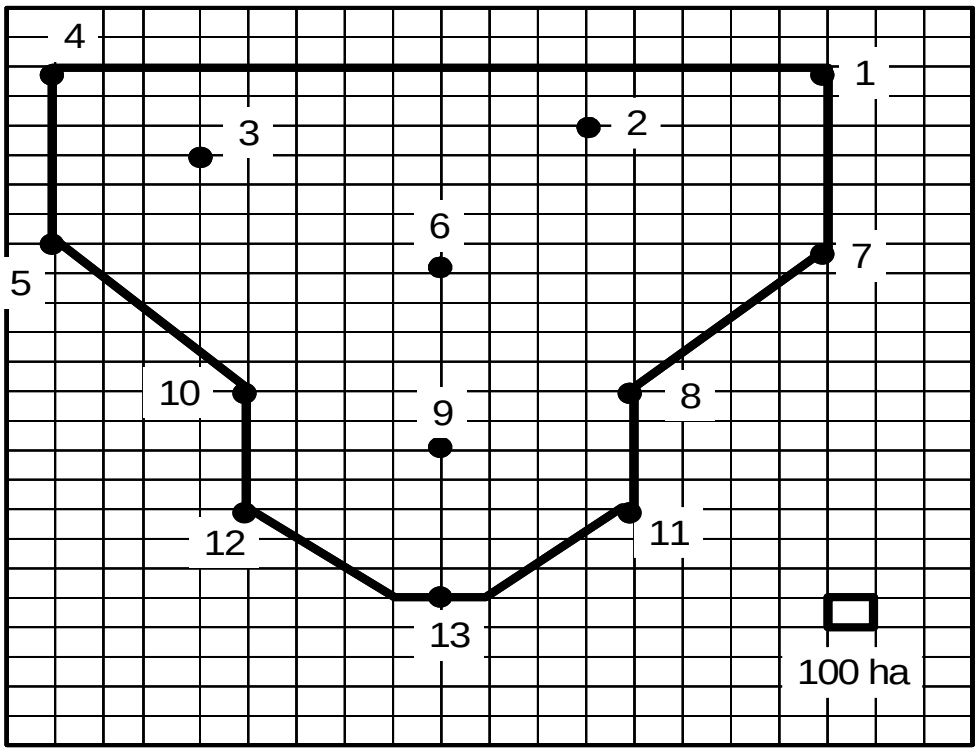
También se utiliza para preparar alternativas para la programación del riego bajo diferentes hipótesis de manejo y de condiciones ambientales; y estimar a producción bajo condiciones de secano y el efecto de las sequías.

El modelo CropWat ofrece dos opciones diferentes para calcular la evapotranspiración: la del “requisito de agua de los cultivos" (suponiendo que las condiciones son óptimas) y la "opción de programación de riego” (incluyendo la posibilidad de especificar la oferta de riego en tiempo real).

Ejercitación

Calcular la precipitación efectiva media por alguno de las metodologías propuestas para la cuenca representada, en base a los valores de precipitación mensuales recogidos con pluviómetro y la tabla de efectividad del U.S. Bureau of Reclamation

ESTACION	Superficie (Hm^2)	Precipitación mensual (mm)
1		105
2		78
3		61
4		59
5		42
6		60
7		77
8		58
9		45
10		40
11		41
12		32
13		29



Calcular la Eto utilizando el programa Cropwat con los datos de la estadística climática Estación La Plata Aero del Climwat.

Calcular el Kc para todos los cultivos utilizando las tablas **Valores de KG según Blaney Cridle (1950)** y **Valores de Kc en función del % del ciclo vegetativo**.

Calcular la Etc de los cultivos

DATOS:

Plan de siembra

Chaucha: KG: 0,65

Cuatro épocas de siembra: 0,90 ha en septiembre, 0,90 ha en octubre, 0,90 ha en noviembre y 0,90 ha en diciembre

Ciclo del cultivo: 5 meses

Meses a considerar: de septiembre a abril

Choclo: KG: 0,80

Tres épocas de siembra: 0,80 ha en septiembre, 0,70 ha en octubre y 0,80 ha en noviembre

Ciclo del cultivo: 6 meses

Meses a considerar: de septiembre a abril

Pimiento: KG: 0,60

Dos épocas de siembra: 0,50 ha en octubre y 0,50 ha en noviembre

Ciclo del cultivo: 5 meses

Meses a considerar: de octubre a marzo

Los métodos de riego propuestos son:

		Eficiencia de aplicación
Chaucha:	aspersión	80 %
Choclo:	surcos	60 %
Pimiento:	goteo	90 %

Datos climáticos Estación La Plata Aero (Bs As) Climwat (FAO)

Latitud: 34ª 58 Sur Altitud: 23 m. SNM

Mes	Ene	feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Temp. Maxima °C	28,8	27,8	25,4	21,9	18,1	14,7	14,3	15,8	17,8	20,7	23,7	27,1
Temp. Minima °C	17,2	16,6	14,7	11,1	8,1	5,6	5,5	5,9	7,5	10,3	12,8	15,5
Humedad Relativa %	71,9	75,4	79,3	83,1	85,2	85,8	88,5	83,3	80,0	80,5	75,1	70,7
u Velocidad viento km/dia	432	415	372	328	337	354	372	406	467	458	458	449
n Nubosidad horas/día	8,1	8,2	6,8	6,2	5,0	4,0	4,1	5,2	5,7	6,7	7,5	7,7
Rs Rad.solar o. c. MJ/m2.day	23,2	21,7	17,0	13,0	9,2	7,2	7,7	10,7	14,2	18,4	21,7	22,9
ETo Evapotr. de ref. mm/dia	5,6	4,9	3,6	2,4	1,6	1,2	1,1	1,7	2,5	3,3	4,4	5,4

Bibliografía.

- Linsley, R.K.; M.Kohler y J Paulus 1967 Hidrología para ingenieros Ed Mc Graw – Hill Castellana Madrid
- Remeneira G 1971 Tratado de Hidrología Aplicada Ed. Técnicos asociados Barcelona
- Luque A L 1981 Hidrologia Aplicada Ed Hemisferio Sur Buenos Aires
- Dastane N G 1974 Precipitación efectiva en la agricultura de regadío Ed FAO Roma
- Blaney H Criddle W 1950 Determining water requirimentes in irrigated areas from climatological and irrigation data USDA Soil Conservation Service Technical Paper 96 Washington

- Chambouleyron, J. 1999. Riego y drenaje.Universidad Nacional de Cuyo. Luján de Cuyo, Mendoza.
- Doorembos y Pruitt W 1976 Las necesidades de riego de los cultivos Estudios FAO Riego y drenaje Nº24 Roma
- Grassi, C. 1993. Fundamentos del riego. RD 38. SIDITA. Mérida.
- Grassi C y J Tevez E 1966 Evapotranspiración de los cultivos en la República Argentina estimada por la fórmula de Grassi y Christiansen IDIA (INTA) 226: 65 – 80
- Luque J A 1970 Aplicación del método de Blaney – Criddle ajustado para la determinación del uso consuntivo, lámina neta y requerimiento de riego en el pais IDIA (INTA) 266: 61 – 69
- Luque J A y J. D. Paoloni. Manual de operación de riego Editorial Hemisferio Sur Bahía Blanca
- Oriolani M J C Wouters O D Bagini R L 1975 Requerimiento hídrico del peral IDIA (INTA) 325/327: 17 – 21
- INTA 1966 Riego y drenaje Editorial INTA Buenos Aires
- Santa Olalla Mañas, F. Y J. Valero. Agronomía del riego. 1993. Ed.Mundi-Prensa, Madrid.
- Stamm, G.G. 1967 Problems and procedures in determining water supply requirements for irrigation projects. Chap. 40 in irrigation of agricultural lands by Hagan et al. Wisconsin, Amer. Soc. Agron. Agronomy II.